

塔拉滩地区光伏电站建设对植被净初级生产力的影响

王祎婷, 邹蕊, 王欣悦, 呼煜浩, 陈媛媛

(西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 710054)

摘要: 塔拉滩地区光伏电站建设对当地生态环境, 特别是植被生长, 产生了重要影响。为了定量描述这种影响, 该研究利用 CASA 模型和区域蒸散模型, 对塔拉滩地区潜在净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 和实际净初级生产力分别进行估算, 并以二者之差表征人类活动的影响, 评估了塔拉滩地区光伏电站建设对植被 NPP 的影响。结果表明: 1) 2010—2020 年塔拉滩植被的实际 NPP 和潜在 NPP 处于上升趋势, 年均实际 NPP 和潜在 NPP 分别为 58.03 和 204.05 g/m² (以 C 计, 下同); 2) 塔拉滩 2010—2020 年间人类活动的年均贡献率为 68.90%, 人类活动是导致塔拉滩植被 NPP 变化的主导因素; 3) 光伏电站对生态环境的影响具有明显的区域和阶段性特征, 光伏电站建设前期由于机械开挖等因素对表层植被具有负面影响, 而后期由于光伏板增温增湿、降低风速等方面产生的环境效应, 能够促进植被生长。该研究有助于理解人类活动对植被净初级生产力动态变化的影响, 并为塔拉滩的植被恢复和高质量发展提供科学依据。

关键词: 人类活动; 共和光伏产业园; 光伏环境效应; 青藏高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.017

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-24-0153-09

王祎婷, 邹蕊, 王欣悦, 等. 塔拉滩地区光伏电站建设对植被净初级生产力的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 153-161. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.017 http://www.tcsae.org

Wang Yiting, Zou Rui, Wang Xinyue, et al. Impact of photovoltaic power plant construction on the net primary productivity of vegetation in the Tala Shoal areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(24): 153-161. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.017 http://www.tcsae.org

0 引言

植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是生产者用于生长、发育和繁殖的能量值^[1], 不仅反映了植物的生产能力, 还能够表示整个区域生态系统的质量, 可以将其作为判断生态系统碳源、碳汇的标准, 也是表示植物固碳能力的重要指标。随着遥感技术的发展, 基于遥感数据的参数模型成为 NPP 估算的主流方法。Potter 等^[2-3]提出的 CASA 模型, 是目前应用最为广泛的 NPP 估算模型之一。如朴世龙等^[4]基于 CASA 模型估算了中国植被 NPP 并分析其空间分布; 朱文泉等^[5]通过改变植被最大光能利用率对内蒙古不同植被的 NPP 进行了估算; 随后又引入植被类型, 有效提高了 NPP 估算的精度^[6]。

气候变化和人类活动是植被 NPP 变化的两大驱动因子。然而, 如何定量分析气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响, 仍存在很大的困难, 也是目前研究中的热点问题^[7]。众多学者研究了中国植被 NPP 和气候变化的关系, 朴世龙等^[8-10]发现降水是中国植被 NPP 变化的主要影响因子, 其他学者发现同一区域不同子区域、不同季节或不同植被类型与气候的影响之间有较强的空间异质性^[11]。相对来说, 人类活动对植被 NPP 变化的影响的相关研究较少, 主要是采

用 HANPP (Human Appropriation of Net Primary Production) 模型来分析人类占用的净初级生产力, 也有学者采用了其他方法来研究人类活动对植被 NPP 的影响^[11-13]。

人类活动包括农林渔牧等各种工程建设现已成为影响地球上各圈层自然环境稳定的主要因素。为有效利用可再生、无污染的太阳能资源, 各地大规模建设光伏电站。在建设光伏电站前期, 机械开挖会直接破坏地表^[14], 严重影响当地气候和生态环境。但在建设完成后, 太阳能电池板通过吸收太阳辐射改变了站内的生态环境^[15]。有研究表明, 光伏板具有增温增湿、降低风速等效应, 能够有效减轻风蚀、保持土壤^[16]。大规模的光伏电站会形成反照率-降水量-植被的正反馈机制^[17], 对站内环境产生积极作用。但是, 由于研究区地理位置、气候条件和下垫面条件的不同, 目前的研究大都基于布设的气象站点观测数据, 其时空代表性非常有限, 缺乏像元尺度上、更长时间序列的相关研究。

因此, 本文以中国青藏高原共和光伏园区所在的塔拉滩戈壁为研究区, 结合理论分析和模型模拟的方法对植被净初级生产力进行估算, 定量评价气候因素和人类活动对研究区净初级生产力的影响及其时空差异, 进而揭示光伏电站建设对塔拉滩植被净初级生产力的影响。本研究有助于挖掘人类活动对植被干扰与保护的潜在作用, 推动定量评价人类活动对植被 NPP 变化影响的研究。

1 研究区概况

塔拉滩戈壁位于青藏高原东部, 地处青海南山以

收稿日期: 2022-10-20 修订日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901301); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2020JQ-739); 遥感科学国家重点实验室开放基金项目 (OFSLRSS201922)

作者简介: 王祎婷, 博士, 副教授, 研究方向为定量遥感与全球变化、尺度效应与尺度转换。Email: wyt_rs@163.com

南, 青海省共和县境内的黄河左岸、共和盆地的中西部, 面积 2 136 km², 海拔 2 600~3 300 m, 如图 1 所示。该区域属于高原温带干旱半干旱草原气候, 年均气温 0.86 °C, 年降水量 280 mm, 年蒸发量 1 620 mm, 具有风频高、风力大的特征。由于区域特殊的气候条件, 加

上人类盲目开荒、超载放牧等活动影响, 该区域是黄河上游和三江源地区风沙危害最严重的地带之一^[18]。光伏电站建设, 由于改变了下垫面的反照率、风廓线、蒸发, 将对环境产生重要影响。选择这一区域开展研究, 具有代表性。

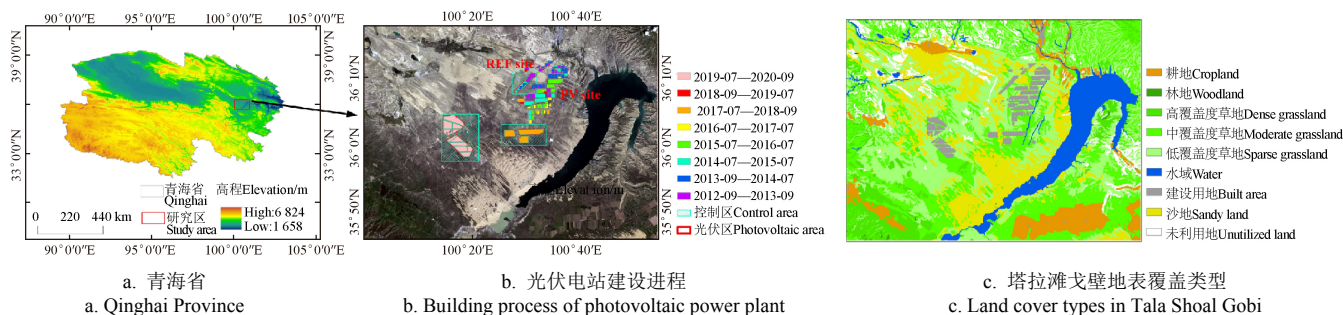


Fig.1 Overview of study area

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及预处理

2.1.1 遥感数据

选择 2010—2020 年 MODIS FPAR 遥感产品 (MOD15A2) 作为估算 NPP 的输入数据。该产品时间分辨率为 8 d, 空间分辨率为 500 m, 共 505 景影像, 再将其整理成月均值数据。

选择 2010—2020 年 MOD17A3 数据集作为 NPP_a 模拟值的验证数据。该产品时间分辨率为 1 a, 空间分辨率为 500 m, 共 11 景影像, 并将其投影为 WGS-84 投影。

2.1.2 气象数据

气象数据选择国家科学气象中心 (http://data.cma.cn/) 提供的共和站站点日值气象数据, 包括日降水量、日均温度和日照时数数据, 时间跨度为 2010—2020 年。

2.2 NPP 估算方法

2.2.1 NPP_p、NPP_a 和 NPP_h 的计算方法

潜在净初级生产力 (NPP_p) 定义为只受气象因子影响的 NPP, 由气候 NPP 模型估算得出。该气候模型^[19]仅考虑气象相关因子, 基于生态生理特征以及与水 and 热相关的区域蒸散模型平衡方程来估算 NPP, 计算式如下:

$$NPP_p = RDI^2 \times \frac{P \times (1 + RDI + RDI^2)}{(1 + RDI) \times (1 + RDI^2)} \times \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25 \times RDI}) \times 50 \quad (1)$$

$$RDI = (0.629 + 0.237 \times PER - 0.00313 \times PER^2)^2 \quad (2)$$

$$PER = \frac{BT \times 58.93}{P} \quad (3)$$

$$BT = \frac{\sum T}{12}, 0 < T < 30 \quad (4)$$

式中 NPP_p 为年潜在 NPP, g/m² (以 C 计, 下同); PER 为年可能蒸散量, mm; BT 为年平均生物温度, °C; RDI 为干燥的辐射指数, 无量纲; P 为年降水量, mm。

实际净初级生产力 (NPP_a) 是指研究区实际的植被

NPP, 由 CASA 模型^[20]计算得出。CASA 模型将 NPP 表示为植被吸收光合有效辐射 (APAR) 和光利用率 (ε) 的乘积, 计算式^[19]如下:

$$NPP_a = APAR \times \varepsilon = PAR \times FPAR \times \varepsilon^* \times T_e \times W_e \quad (5)$$

式中 NPP_a 为月实际 NPP (g/m²); PAR 是总入射光合有效辐射 (MJ/m²), 占太阳总辐射的 50%; 根据月日照时数数据, 使用 Angstrom-Prescott 方程计算月太阳辐射。FPAR 是光合有效辐射比, 由 MODIS FPAR 产品作为输入。ε* 是最大光能利用效率, 根据植被类型来确定, 鉴于塔拉滩主要覆盖类型为草地, 在建设光伏电站后, 由于人为保育和光伏电站的生态效应, 依旧会恢复至草地, 故设定为 0.61 g/MJ (以 C 计, 下同)^[21]。T_e 和 W_e 是温度胁迫和水分胁迫。

NPP_p 和 NPP_a 的差值 (NPP_h) 可用来表示人类活动对 NPP 的影响^[19,22]。其计算如下:

$$NPP_h = NPP_p - NPP_a \quad (6)$$

当 NPP_h > 0 时, 表明人类活动对 NPP 具有负面影响, 值越大, 对 NPP 的占用就越大, 即人类对土地的利用集约化 (强度) 就越大; NPP_h < 0 时, 表明人类活动对植被呈现保育作用。

2.2.2 NPP 变化及其归因分析

采用线性回归的方法计算 NPP 的年际变化趋势, 并将线性回归方程的斜率作为 NPP 年际变化趋势 (slope)^[23], 这种方法被广泛应用于植被遥感分析中。计算式为

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NPP_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (7)$$

式中 NPP_i 为第 i 年的 NPP 值, i 从 1 到 n; n 为监测时段的年数 (n=11)。当 slope > 0 时, NPP 增加, 反之则减少。

通过对比 2010—2020 年 NPP_a、NPP_p 和 NPP_h 的年际变化趋势差异, 实现气候变化和人类活动对 NPP 影响的定量分析。根据 NPP 年际变化趋势差异, 将 NPP 变化分为 6 类^[24], 如表 1 所示。

表 1 NPP 变化情景设定方案
Table 1 Scenario setting scheme of NPP changes

NPP _a 趋势 NPP _a trend	NPP _p 趋势 NPP _p trend	NPP _h 趋势 NPP _h trend	NPP 变化类型 Types of NPP change
	>0	>0	气候变化引起的 NPP 增加
>0	>0	<0	气候变化和人类活动共同引起的 NPP 增加
	<0	<0	人类活动引起的 NPP 增加
	<0	<0	气候变化引起的 NPP 下降
<0	<0	>0	气候变化和人类活动共同引起的 NPP 下降
	>0	>0	人类活动引起的 NPP 下降

注：NPP_a 趋势为塔拉滩 2010—2020 年实际植被 NPP 变化率；NPP_p 趋势为塔拉滩 2010—2020 年潜在植被 NPP 变化率；NPP_h 趋势为塔拉滩 2010—2020 年受人类活动影响的植被 NPP 变化率。
Note: NPP_a trend is the slope of actual vegetation NPP from 2010 to 2020 in Tala Shoal; NPP_p trend is the slope of potential vegetation NPP from 2010 to 2020 in Tala Shoal; NPP_h trend is the slope of vegetation NPP affected by human activities from 2010 to 2020 in Tala Shoal.

2.2.3 人类活动对 NPP 变化的贡献率

RCI(Relative Contribution Index)指 NPP_h 与潜在 NPP 的比值。该指标指示了人类活动对潜在生物净初级生产力的占有程度，反映该地区土地利用的强度的大小^[25]。具体公式如下

$$RCI = \frac{NPP_h}{NPP_p} \quad (8)$$

若 RCI>0，表示人类活动对植被生长具有负面干扰作用，造成植被净初级生产力的损失；若 RCI<0，表示人类活动对植被起到保育作用，能促进植被净初级生产力的增加。RCI 值域在[-1,1]，RCI 绝对值越大，表示人类活动对植被净初级生产力变化的影响越明显；当 |RCI|>0.5 时，表示人类活动在植被 NPP 变化的驱动因素中占主导地位^[26]。

3 结果与分析

3.1 NPP_a 的模拟及其验证

由于缺乏地面实测的 NPP 数据，本研究将模拟的年均 NPP_a (图 2a) 与 MOD17A3 数据产品 (图 2b) 进行对比，验证结果的有效性，如图 2 所示。由 NPP_a 和 MODIS NPP 多年均值的空间分布对比可知，二者空间趋势非常一致，而 MODIS NPP 与 NPP_a 相比存在系统性偏差，这与相关研究结论^[27]一致，表明本文估算结果精度可靠。

3.2 NPP 的时空变化特征

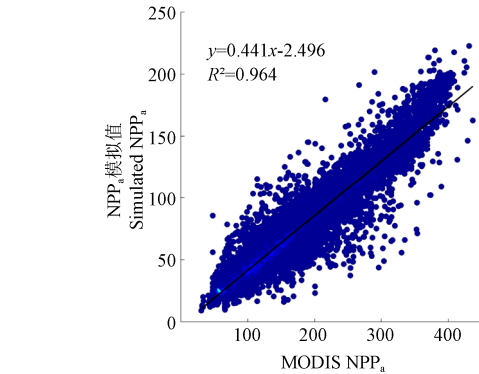
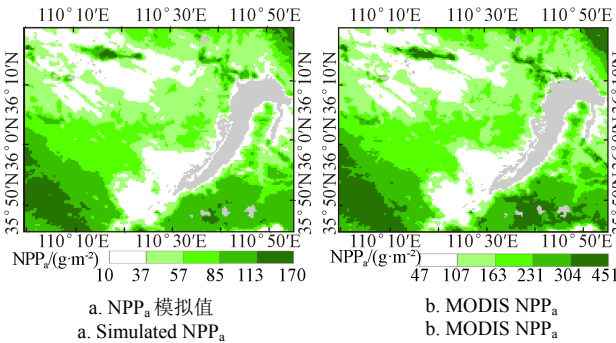
3.2.1 时间变化特征

2010—2020 年塔拉滩 NPP_a、NPP_p 和 NPP_h 均呈现波动上升的趋势，如图 3 所示，多年 NPP_a、NPP_p 和 NPP_h 平均值分别为 58.03、204.05 和 146.02 g/m²。NPP_p 和 NPP_h 在 2011 年最低，在 2018 年达到近 11 年的峰值。塔拉滩地区 NPP_a 在 2013 年整体呈下降趋势，可能是受到光伏电站建设的影响，但整体上 NPP_a 呈现上升趋势，并不会因为局部建设光伏电站而导致 NPP_a 整体下降。

3.2.2 空间变化特征

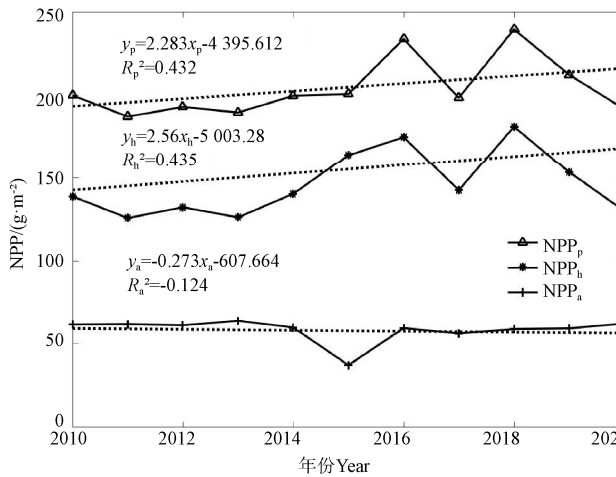
多年 NPP_a 均值 (图 4a) 在 10.05~170.17 g/m² 之间，空间分异明显，呈现西北低南方高，在龙羊峡水库有较

明显的分界，位于西岸的塔拉滩戈壁沙地的 NPP_a 最低，而处于东岸的高覆盖度草地和耕地的 NPP_a 较高。从图 4b 来看，人类对 NPP 的占用在 33.87~204.05 g/m² 之间。NPP_h 和 NPP_a 的空间分布相似，人类活动对位于研究区西南和东南部的林地和高覆盖度草地的 NPP 占用较小，而位于塔拉滩戈壁沙地的 NPP_h 最高。



c. 塔拉滩 NPP_a 模拟值与 MODIS NPP_a 的比较
c. Comparison between simulated NPP_a and MODIS NPP_a in Tala Shoal
图 2 NPP_a 精度验证

Fig.2 Validation of estimated NPP_a



注：y_p 为潜在植被 NPP 与年份之间的线性关系；y_h 为受人类活动影响的植被 NPP 与年份之间的线性关系；y_a 为实际植被 NPP 与年份之间的线性关系。
Note: y_p is the linear relationship between potential vegetation NPP and year; y_h is the linear relationship between vegetation NPP affected by human activities and year; y_a is the linear relationship between actual vegetation NPP and year.

图 3 塔拉滩 NPP_a、NPP_p 和 NPP_h 的年际变化

Fig.3 Inter-annual variation of NPP_a, NPP_p and NPP_h in Tala Shoal

从植被 NPP_a 的空间变化趋势来看 (图 5a)，2010—2020 年间塔拉滩植被 NPP_a 增加和减少的区域相间分布，平均每

年减少 0.30 g/m^2 , NPP_h 的变化趋势 (图 5b) 与其相似, 平均每年增加 2.56 g/m^2 , 二者呈现较强的负相关性, 即当 NPP_a 减少时, NPP_h 则增加。位于西南部的高覆盖度草地的 NPP_h 呈增长趋势, 最大可每年增加 11.9 g/m^2 。西南部耕地由于人类活动的保育作用, NPP_h 每年减少 2.1 g/m^2 。2013—2015 年间光伏电站建设区域的 NPP_a 呈增长趋势, 而 2018—2020 年间光伏建设区域 NPP_a 呈减少趋势, 说明光伏电站建设的不同阶段所产生的生态环境效应也有所不同。

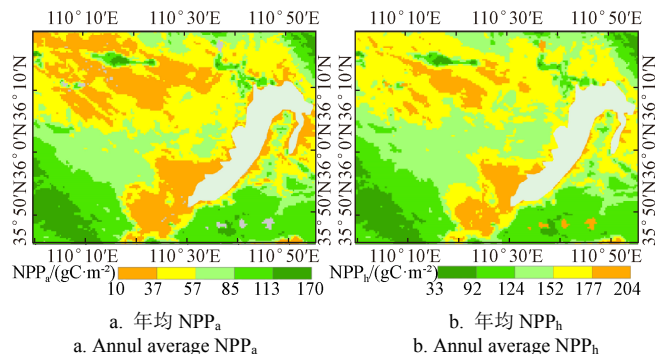


图 4 塔拉滩 2010—2020 年均 NPP_a 和 NPP_h 空间分布
Fig.4 Spatial distribution of multiyear average NPP_a and NPP_h from 2010 to 2020 in Tala Shoal

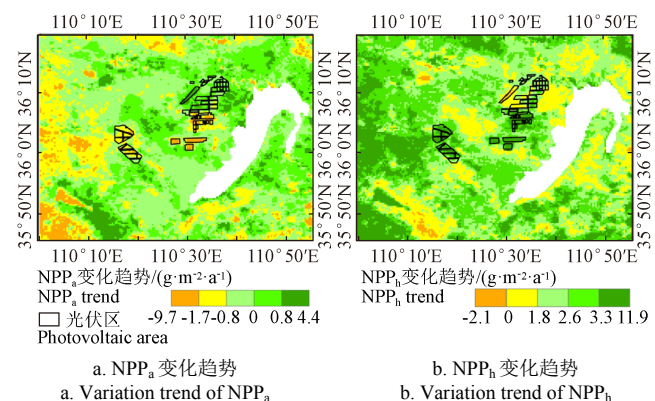


图 5 塔拉滩 2010—2020 年 NPP 年际变化趋势空间分布
Fig.5 Spatial distribution of inter-annual trends of NPP from 2010 to 2020 in Tala Shoal

3.3 人类活动对 NPP 的影响

3.3.1 气候变化与人类活动对植被 NPP 的影响

根据情景设定方案^[24]来定量评估气候变化和人类活动对 NPP 的影响, 结果如图 6 所示。气候变化和人类活动对 NPP 的影响相间分布, 其中, 塔拉滩地区 NPP 增加主要是受到气候变化的影响, 面积约为 $2\,120.14 \text{ km}^2$, 占 39.53%。而由气候变化和人类活动共同引起的 NPP 增加不到 1%, 主要位于早期 2013 年光伏电站建设区和西南小部分耕地。此外, 人类活动是导致该地区植被 NPP 减少的主要原因, 占比高达 59.97%。说明人类活动是导致近 11 年塔拉滩 NPP 变化的主要因素。

3.3.2 人类活动相对影响贡献率

通过统计分析人类活动相对影响贡献率指数 (RCI) 的年际变化规律发现 (图 7): 2010—2020 年间塔拉滩 RCI 在 0.62 至 0.82 之间波动, 整体上呈现上升趋势, 说明该地区人类活动对净初级生产力的影响仍表现为干扰或消耗。2010—2020 年 RCI 均大于 0.5, 说明人类活动是

造成塔拉滩植被 NPP 变化的主导因素, 其中人类活动对沙地及低覆盖度草地的影响较大, 2015 年之后 RCI 有所下降, 说明人类活动的负面影响在减小。塔拉滩 2010—2020 年间人类活动的年均贡献率为 68.90%。

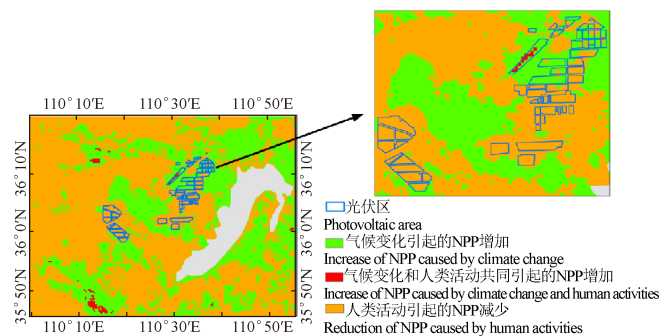


图 6 气候变化和人类活动对 NPP 变化的影响

Fig.6 Effects of climate change and human activities on NPP changes

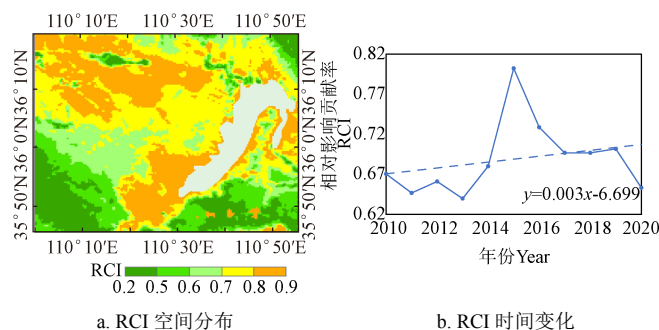


图 7 塔拉滩 2010—2020 年 RCI 时空特征

Fig.7 Spatial and temporal characteristics of the relative contribution index (RCI) from 2010-2020 in Tala Shoal

3.4 光伏电站对 NPP 的影响

3.4.1 光伏区与控制区的时间变化

为了研究建设光伏电站对植被 NPP 的影响, 分别统计了 2013 年、2018 年和 2020 年所建设光伏电站的区域 (下简称“光伏区”) 和与其邻近的控制区 NPP_a 和 NPP_h 的均值, 如图 8 所示。图中黑色虚线代表了光伏电站的具体建设时间。图中 2018 年和 2020 年光伏电站建设完成之前 NPP_a 出现了下跌趋势, 根据光伏电站建设进程来看 (图 1b), 大规模建设光伏电站需要 1~2 a, 对于 2018 年建设完成的光伏电站实际在此之前就会进行机械开挖, 破坏地表植被, 导致 NPP_a 下降。而 2013 并未出现此变化, 这是因为该光伏区主要包含 2012 年 9 月至 2015 年 7 月共三个阶段建设的光伏电站。第一个阶段 (2012-09—2013-09) 建设的光伏电站仅占 37%, 其他两个阶段建设的光伏电站占比达到了 63%, 主要于 2013 年开始建设。因此 NPP_a 从 2013 年开始下降, 直到第 3 年后 NPP_a 逐渐增加。这表明, 光伏电站建设后的短期内由于表层开挖等因素会造成 NPP 下降, 而通过对局部区域播撒草种^[28], 以及光伏板生态效应持续发挥作用, 促进了植被恢复, 提高了植被 NPP。

3.4.2 光伏区与控制区的空间分布

图 9 展示了 2013、2018 和 2020 年建设的光伏电站在特殊年份 NPP_h 的空间分布变化情况。光伏区的 NPP_h

明显要高于周围控制区，这与光伏电站建站初期的地表破坏有关。其中，2013 年建造的光伏区和控制区 NPP_h 在前期无明显差异，但在 2018 年时 NPP_h 有明显下降，

而 2018 和 2020 年建造的光伏区前期 NPP_h 明显高于控制区，这也说明了光伏电站建设对植被的影响具有前期负面、后期正面的阶段性特征。

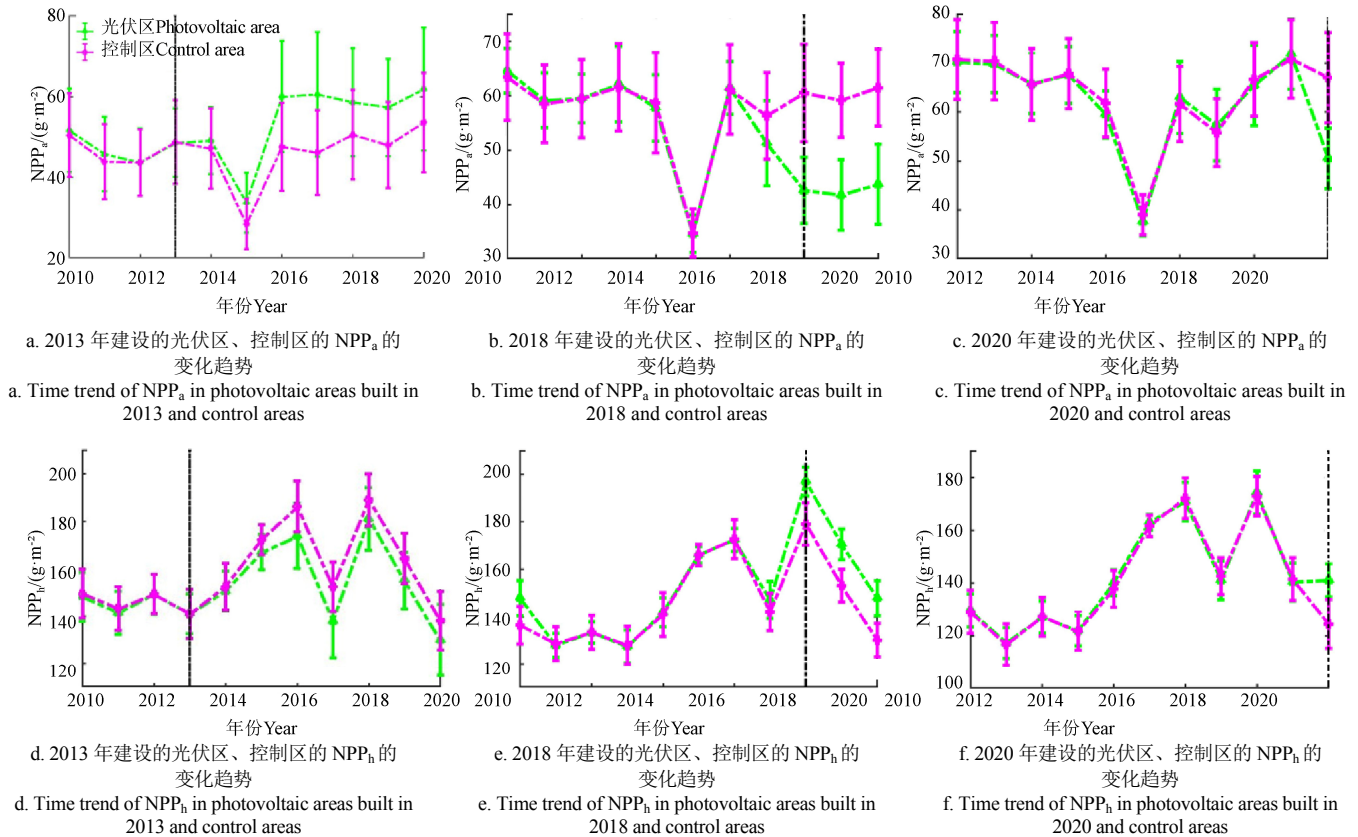


图 8 不同建设时间的光伏区、控制区的 NPP_a 和 NPP_h 的变化趋势

Fig.8 Time trend of NPP_a and NPP_h in photovoltaic areas built in different years and control areas

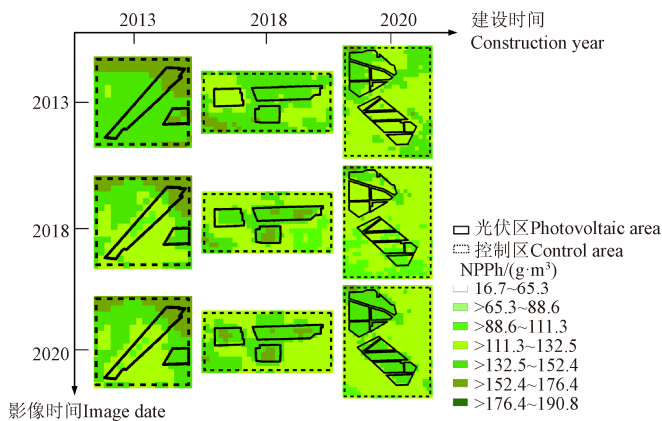


图 9 2013、2018 和 2020 年光伏区和控制区的对比

Fig.9 Detailed comparison of photovoltaic and control areas in 2013, 2018 and 2020

4 讨论

4.1 光伏板遮挡对 NPP 估算的影响

FPAR 作为本文估算 NPP 唯一的遥感数据，光伏板对太阳光和卫星信号的遮挡不可避免地会影响到 FPAR 的估算，进而影响到 NPP 的准确估算。为定量评估这种影响，本文首先基于 MODIS FPAR 数据，通过在板内外选择空间邻近且均质的典型像元，对比光伏板内外 FPAR

的差异。如图 10a 所示，所有纯光伏像元和非光伏像元成对出现且均匀分布于光伏板内外。如图 10b 所示，光伏板外像元 FPAR 值略高于板内像元 FPAR 值，总体上二者高度一致，散点图分布集中于 1:1 线附近，差异很小，说明光伏板遮挡对 FPAR 的影响很小。

此外，由于 NDVI 和 FPAR 之间的线性关系得到了大量研究证实^[29-30]，本文进而分析了 MODIS FPAR 和 NDVI 之间的关系，如图 10c 所示，二者具有很好的线性关系。由此，可进一步在高分辨率尺度上分析光伏板遮挡对卫星观测信号和 NDVI 的影响，从而近似分析其对 FPAR 的影响。

从太阳辐射在光伏板内外传输过程出发，如图 11 所示，在忽略背景反射的前提下，对光伏板内像元，卫星观测的反射率为板下植被反射经光伏板透射后的反射率，此过程包含两次光伏板透射，如式 (9) 所示。对板外像元，卫星观测的反射率即为植被反射率，如式 (10) 所示。

$$R_{\text{inside}} = T_{\text{panel}} \times R_{\text{veg}} \times T_{\text{panel}} \quad (9)$$

$$R_{\text{outside}} = R_{\text{veg}} \quad (10)$$

式中 R_{inside} 为光伏板内像元反射率； R_{outside} 为光伏板外像元反射率； T_{panel} 为光伏板透过率； R_{veg} 为植被反射率。反射率是物体反射的辐射能量与入射辐射能量的比值，无

量纲。

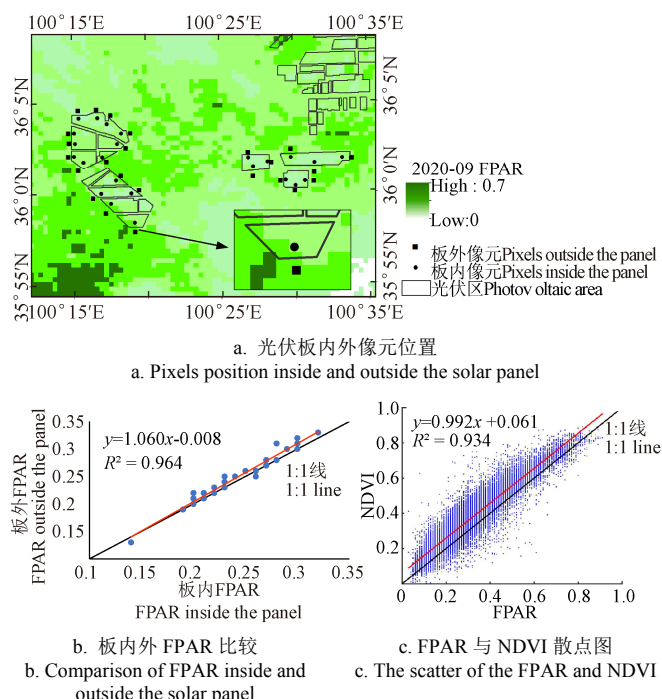


图 10 光伏板内外 FPAR 的对比

Fig.10 Comparison of FPAR inside and outside the solar panel

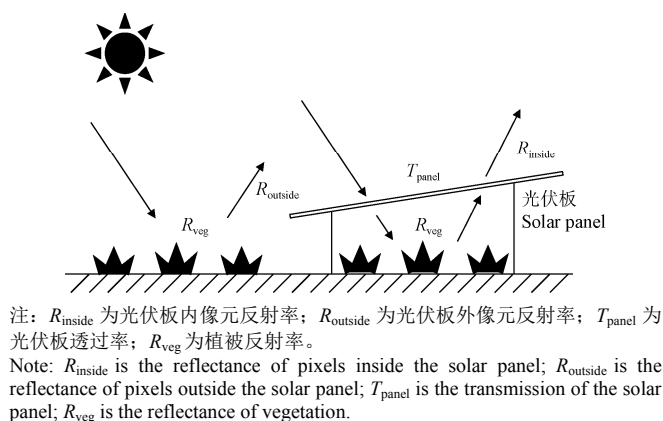


图 11 光伏板内外像元植被反射信号的辐射传输过程

Fig.11 Radiative transfer processes of reflected signals at pixels inside and outside the solar panel

因此,选择植被生长状况相似的光伏板内外像元,即可通过板内外反射率的比值,由式(9)和(10)求解光伏板的透射率。

为此,本文基于高分辨率的 sentinel-2 多光谱数据,在光伏板内外选取空间邻近的像元对,假设像元对上植被生长状况相似,依次求解光伏板对红光和近红外波段的透射率,如图 12b 所示。由图 12a 所示,选取的光伏板像元对成对出现、且均匀分布于区域内,且板内外像元的 NDVI 值非常近似。计算结果表明,光伏板对红光和近红外波段的透射率近似呈 1:1 的线性关系,透射率范围约为 0.75~0.90,这说明光伏板确实会存在一定遮挡效应,该效应在红光、近红外波段相似,因而对 NDVI 影响较小。如图 12c 所示,几乎所有板内外像元 NDVI 值都分布在 1:1 线 ± 0.05 的范围内,总的均方根误差 (Root

Mean Square Error, RMSE) 约为 0.02,说明光伏板遮挡对 NDVI 的影响较小,由此可推出对 FPAR 的影响也较小。图 12c 同样表明,多数像元对的板内 NDVI 值略高于板外,这与刘向等^[31]发现光伏板下的群落和地上生物量都要高于光伏板外的结论相似,说明光伏电站的建设有利于植被生长。

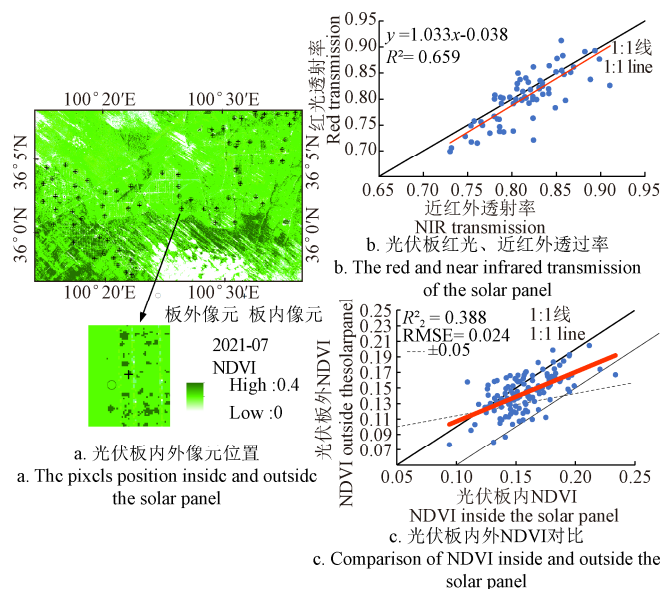


图 12 光伏板对红光和近红外的透射率

Fig.12 Red and near-infrared transmission of the solar panel

由于 FPAR 主要是由红光、近红外波段反射率计算得出^[32],而光伏板对两个波段的透射率相近且在较高水平,导致光伏板对 FPAR 估算产生的实际影响比较小。这从 MODIS FPAR 空间分布和光伏板内外像元 FPAR 的对比中可以得到证实。因此,光伏板遮挡对 NPP 估算的影响也较小,NPP 估算结果中板内外像元并未表现出明显的差异也可以证实这一点。并且,本文关注的重点是长时间序列研究,光伏板遮挡对长期趋势分析的影响可忽略不计。未来研究中,我们会进一步考虑通过现场测量手段直接获取光伏板的透射率数据和板下的植被覆盖情况,以更好地评估光伏板遮挡对 FPAR 和 NPP 估算的影响。

4.2 NPP 估算精度验证

在塔拉滩光伏园区内已建有通量观测站,但是尚未获取到长时间有效观测数据,难以与本文估算结果进行对比验证。因此,本文通过与 MODIS NPP 产品进行对比分析,发现本文估算结果与 MODIS NPP 之间存在系统偏差,这与现有的研究结论一致,如刘亮等^[27]的研究结果。并且,本研究估算的塔拉滩 NPP 空间分布趋势与刘旻霞等^[33]计算的结果一致,塔拉滩估算的实际 NPP 均值大约为 60 g/m²,与高清竹等^[34-35]估算的高寒草地 NPP 值相近。这说明本文估算结果精度较为可靠。但是,基于 CASA 模型估算 NPP 仍存在一些不确定性因素^[36-37]。首先,CASA 模型中的最大光能利用率是根据植被类型赋予的经验值,地域差异会导致其实际的光能利用率与经验值之间存在偏差,进而影响 NPP 估算精度。其次,本

文研究区域较小, 因此估算中温度、降水等气象参数都来自于站点观测数据, 站点数据的代表性也会影响估算精度。未来可结合地域特征来优化这些参数以减小模拟结果的不确定性。

此外, 对于塔拉滩光伏园区而言, 光伏板遮挡是影响 NPP 估算的重要因素。我们已通过试验研究了光伏板遮挡对 FPAR 的影响, 基本证实了光伏板遮挡对板下 NPP 估算的影响较小。在未来研究中, 我们会进一步通过现场实测方法来获取光伏板内 NPP 数据, 以更精确地评估光伏板遮挡对 NPP 估算的影响。

4.3 光伏电站对 NPP 的影响机制

为了探究光伏电站对 NPP 的影响机制, 本文获取了光伏园区内站内外站外的气象数据^[35], 包括 2020 年站内外空气温度、土壤湿度以及风速。数据表明: 1) 站内日间平均空气温度为 8.35 °C, 比站外高 0.04 °C。这是由于光伏板通过吸收一部分太阳辐射并将其转换为电能, 长时间工作使光伏电板发热, 再加上自身电流热效应, 增加了站内近地气温。2) 站内土壤湿度比站外高 0.18 m³/m³。光伏板的遮阴作用减小了地表水分蒸发速率, 站内实际蒸散量降低, 植被受水分胁迫小。3) 站内风速比站外低 0.89 m/s, 只有 1.34 m/s。这是因为光伏板的遮挡减弱了到达站内的风能, 站内风速降低, 减少了水分蒸发。此外, 光伏电站建设完成后, 园区工作人员有意识地在地表破坏严重的局部区域种植防风治沙绿植^[28]、灌溉施肥^[31], 同时光伏板的定期清洗给站内地表提供水分, 增加站内土壤湿度。这些人为活动对光伏园区内植被 NPP 的提高具有一定的促进作用。

综上所述, 光伏电站能够增加近地温度、涵养水分、降低风速, 为植被生长创造了良好的生态环境, 促进光伏园区内植被生长。

5 结 论

本研究基于 MODIS FPAR 数据和气象数据, 利用 CASA 模型和区域蒸散模型估算了塔拉滩的实际净初级生产力 (NPP_a) 和潜在净初级生产力 (NPP_h), 根据 NPP 产品验证了实际 NPP 的模拟精度, 并探讨了其空间格局与年际动态。用潜在 NPP 和实际 NPP 的差来表示人类活动对 NPP 的占用 (NPP_h), 分析了其年际变化和空间分布特征, 构建人类活动相对贡献率 (RCI) 来探讨人类活动对塔拉滩植被 NPP 变化的影响, 并分析了塔拉滩地区光伏电站建设对植被 NPP 的影响。主要结论如下:

1) 塔拉滩的实际 NPP 和潜在 NPP 年均值呈现波动增加的趋势。空间分布上, 实际 NPP 呈现西北低南方高, 在龙羊峡水库有较明显的分界, 水库西部的 NPP_a 高于东部; NPP_h 的空间分布特征与其相似, 其值在 33.87~204.05 g/m² 之间, 年均值 146.02 g/m², 其中, 人类活动对沙地及低覆盖度草地的 NPP 占用较高。

2) 塔拉滩 2010—2020 年间 RCI 在 0.62~0.82 之间波动, 最低值出现在 2013 年, 最低为 0.62, 直到 2015 年达到最大值 0.82, 期间内 RCI 均大于 0.5, 表明人类活动是塔拉滩 NPP 变化的主导因素。

3) 光伏电站建设对 NPP 的影响表现出明显的区域和阶段特征: 在光伏电站初期光伏区 NPP 明显低于控制区, 而后期光伏区 NPP 逐渐增加, 表明光伏电站建设前期对生态环境具有负面影响, 后期则对植被生长有促进作用。

[参 考 文 献]

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [3] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [4] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608. Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(5): 603-608. (in Chinese with English abstract)
- [5] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300. Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, et al. Advance in terrestrial Net Primary Productivity (NPP) estimation models[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 296-300. (in Chinese with English abstract)
- [6] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424. Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424. (in Chinese with English abstract)
- [7] Gao T, Xu B, Yang X C, et al. Aboveground net primary productivity of vegetation along a climate-related gradient in a Eurasian temperate grassland: Spatiotemporal patterns and their relationships with climate factors[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(1): 1-10.
- [8] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(4): 563-569. Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in China during 1982-1999[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(4): 563-569. (in Chinese with English abstract)
- [9] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 等. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1546-1553. Hou Yingyu, Liu Qinhuo, Yan Hao, et al. Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in 1982-2000[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1546-1553. (in Chinese with English abstract)
- [10] 梁妙玲, 谢正辉. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(5): 582-592.

- Liang Miaoling, Xie Zhenghui. Simulations of climate effects on vegetation distribution and net primary production in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(5): 582-592. (in Chinese with English abstract)
- [11] Zhang Y, Pan Y, Zhang X, et al. Patterns and dynamics of the human appropriation of net primary production and its components in Tibet[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 210: 280-289.
- [12] Zhang F, Pu L, Huang Q. Quantitative assessment of the Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP) in the coastal areas of Jiangsu, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(12): 15857-15870.
- [13] Chen A, Li R, Wang H, et al. Quantitative assessment of human appropriation of aboveground net primary production in China[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 312: 54-60.
- [14] 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.
- Yuan Senpeng, Zhang Zhenshi, Dang Tinghui, et al. Comparative study of growth status of three plant measures and its ecological functions in photovoltaic power station of Mu Us sandy land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 235-239. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王祯仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 191-196.
- Wang Zhenyi, Wang Ji, Gao Yong, et al. Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 191-196. (in Chinese with English abstract)
- [16] 林沛圳. 光伏电站对生态环境的影响控制研究[J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(7): 146-148.
- Lin Peizhen. Research on the impact control of photovoltaic power stations on ecological environment[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(7): 146-148. (in Chinese with English abstract)
- [17] Li A, Eugenia K, Safa M, et al. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation[J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1019-1022.
- [18] 李森, 董玉祥, 董光荣, 等. 青藏高原土地沙漠化区划[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 418-427.
- Li Sen, Dong Yuxiang, Dong Guangrong, et al. Regionalization of land desertification on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 418-427. (in Chinese with English abstract)
- [19] Xu H, Wang X, Zhang X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 251-259.
- [20] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学.
- Zhu Wenquan. Remote Sensing Estimation of Net Primary Productivity of Terrestrial Ecosystem Vegetation in China and Its Relationship with Climate Change[D]. Beijing: Beijing Normal University. (in Chinese with English abstract)
- [21] Zhang Y, Qi W, Zhou C, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 24(2): 269-287
- [22] Erb K H, Krausmann F, Gaube V, et al. Analyzing the global human appropriation of net primary production--Processes, trajectories, implications. An introduction[J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 250-259.
- [23] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- Li Huixia, Liu Guohua, Fu Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5495-5504. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张良侠, 岳笑, 周德成, 等. 气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响[J/OL]. *环境科学*, [2022-12-10]. DOI:10.13227/j.hjlx.202206156.
- Zhang Liangxia, Yue Xiao, Zhou Decheng, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation restoration in typical grasslands of China[J]. *Environment Science*, 2022, [2022-12-10]. DOI:10.13227/j.hjlx.202206156. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李枫, 蒙古军. 黑河中游净初级生产力的人类占用时空分异[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 743-752.
- Li Feng, Meng Jijun. Temporal and spatial variation of human appropriation of net primary productivity in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 743-752. (in Chinese with English abstract)
- [26] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 NPP 的影响[D]. 吉林: 东北地理与农业生态研究所, 2014.
- Mao Dehua. Quantitative Assessment in the Impact of Human Activities on Net Primary Productivity of Wetlands in the Northeast China[D]. Jilin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘亮, 关靖云, 穆晨, 等. 2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(12): 4861-4871.
- Liu Liang, Guan Jingyun, Mu Chen, et al. Spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity in the Ili River Basin from 2008 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12): 4861-4871. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘乐艺. 青海戈壁荒滩兴起“光伏海”[N]. *人民日报海外版*, 2022-07-05.
- [29] 王保林. 大针茅典型草原冠层光合有效辐射各分量变化规律分析[J]. *青海草业*, 2018, 27(1): 2-6.
- Wang Baolin. A study on the vegetation of pivotal photosynthetic active radiation parameters of a stipa grandis typical steppe[J]. *Qinghai Prataculture*, 2018, 27(1): 2-6. (in Chinese with English abstract)
- [30] Dong T, Meng J, Shang J, et al. Modified vegetation indices for estimating crop fraction of absorbed photosynthetically active radiation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(12): 3097-3113.
- [31] 刘向, 张鹏, 刘建全. 无机肥料是青海塔拉滩光伏电站植被恢复过程中的限制性因子[J]. *生物多样性*, 2022, 30(5): 29-36.
- Liu Xiang, Zhang Peng, Liu Jianquan. Inorganic fertilizers are limiting factors of vegetation restoration of Qinghai Tala

- Shoal Photovoltaic Power Station[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(5): 29-36. (in Chinese with English abstract)
- [32] Knyazikhin Y, Glassy J, Privette J, et al. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document[Z]. 1999.
- [33] 刘旻霞, 焦骄, 潘竟虎, 等. 青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5306-5317.
- Liu Minxia, Jiao Jiao, Pan Jinghu, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5306-5317. (in Chinese with English abstract)
- [34] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 等. 藏北高寒草地 NPP 变化趋势及其对人类活动的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4612-4619.
- Gao Qingzhu, Wan Yunfan, Li Yue, et al. Trends of grassland NPP and its response to human activity in Northern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4612-4619. (in Chinese with English abstract)
- [35] 乔郭亮, 金晓斌, 顾铮鸣, 等. 2000-2018 年天山中段高海拔草地暖季承载力[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 253-252.
- Qiao Guoliang, Jin Xiaobin, Gu Zhengming, et al. Carrying capacity of high-altitude grassland in warm seasons in the middle section of Tianshan Mountain from 2000 to 2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(22): 253-252. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张金亭, 董艳超, 叶宗达. 基于地形改进 NPP 指数的县域耕地产能测算[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 227-234.
- Zhang Jintong, Dong Yanchao, Ye Zongda. Calculation of county-level cultivated land productivity based on NPP index corrected by topography[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(10): 227-234. (in Chinese with English abstract)
- [37] 魏晓帅, 高永龙, 范雅倩, 等. 北京植被净初级生产力对物候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 167-175.
- Wei Xiaoshuai, Gao Yonglong, Fan Yaqian, et al. Responses of the net primary productivity of vegetation to phenological changes in Beijing of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 167-175. (in Chinese with English abstract)

Impact of photovoltaic power plant construction on the net primary productivity of vegetation in the Tala Shoal areas

Wang Yiting, Zou Rui, Wang Xinyue, Hu Yuhao, Chen Yuanyuan

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Many photovoltaic power plants have been built in China in recent years, due to the clean and renewable solar energy resources. However, ecological consequences are inevitably caused on the local and regional scales. Current studies focused mainly on the ecological impact of solar panels using in-situ meteorological observations, particularly subjected to very local scales and short periods. It is necessary to implement it at the regional scale for long periods. In this study, the moderate resolution satellite data was utilized to investigate the impact of photovoltaic power plant construction on the net primary productivity (NPP) of vegetation in Tala Shoal. The difference between actual and potential NPP was calculated to quantify the impact of solar panels on the spatiotemporal variations from 2010 to 2020. Firstly, the actual and potential NPP were computed using MOD15A2 and meteorological data, according to the CASA and the regional evapotranspiration model, respectively. The estimated actual NPP was verified as reliable with the MODIS NPP product data (MOD17A3). Secondly, a linear regression was used to analyze the temporal trend of the actual and the NPP that was influenced by human activities. A relative contribution index was then constructed to determine the influence magnitude of human activities on the NPP. The contribution of human activities was analyzed using land cover data. Thirdly, three typical areas were selected as the solar power plants that were constructed in different years. The NPPs were compared in the solar power plant construction area and the surrounding control area. The temporal trend of NPP was analyzed in the three typical areas to find the changing pattern of NPP in the period before and after the solar power plant construction. As such, the different impacts were revealed for the solar panels that were constructed in different years in the local areas. The results showed that: 1) There was an increasing trend in the actual and potential NPP in the study area from 2010 to 2020, with the annual average actual and potential NPP values of 58.03, and 204.05 g/m², respectively, indicating the low in the northwestern areas and high in the southern areas; 2) The average contribution of human activities to the NPP changes was 68.9%, indicating the dominant factors driving the NPP changes. 3) There were different ecological impacts of solar panels that were built in different years over time. In the short term, the solar panels caused a decrease in the NPP, indicating a destructive effect on the vegetation due to mechanical excavation. By contrast, the solar panels caused an increase in the NPP in the long term, probably due to the increased temperature and humidity under the solar panels, and the reduced wind speed for better vegetation growth. Consequently, there was a different impact of solar photovoltaic panels on the dynamic changes in vegetation net primary productivity. The finding can also provide the scientific basis for vegetation restoration and high-quality development in Tala Shoal.

Keywords: human activities; Gonghe photovoltaic industrial park; environmental effects of solar panel; Tibetan Plateau