

doi: 10.6046/zrzyyg.2020376

引用格式: 伯英杰, 曾业隆, 李国庆, 等. 浮岛光伏电场对地表温度空间分布特征的影响[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 158 – 168. (Bo Y J, Zeng Y L, Li G Q, et al. Impact of floating solar park on spatial pattern of land surface temperature[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 158 – 168.)

浮岛光伏电场对地表温度空间分布特征的影响

伯英杰^{1,2}, 曾业隆³, 李国庆¹, 曹兴文⁴, 姚清秀²

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;
3. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 近些年我国光伏产业发展迅速, 评估大型光伏电场对环境的影响对指导光伏产业的健康发展具有重要意义。光伏电场对局地热环境的改变开始得到了国内外研究人员的关注。浮岛(也称水面漂浮式)光伏电场作为近年来光伏发电的新开发模式, 其对地表温度(land surface temperature, LST)空间分布特征的影响尚不清晰。该文基于 Landsat8 时间序列遥感数据, 利用单通道算法提取了安徽省淮南市典型浮岛光伏电场及其邻近区域的 LST 数据集, 通过构建逐月 LST 与对应月份的气温之差(LST_{s-m})判断光伏电场对 LST 空间分布特征的影响模式、影响范围和季节差异进行了分析, 并明确了建设区不同建设阶段对 LST 的影响程度。结果表明: ①浮岛光伏电场的建设明显改变了建设区的热环境, 在温度变化最明显的夏季和冬季都存在增温效应, 增温效应主要集中在建设区 200 m 范围内, 对其周围典型地类的增温效应非常微弱。②浮岛光伏电场建设阶段和建成阶段, 建设区的月均 LST 普遍高于水体, 接近于林地的 LST; 2 个阶段的年均增温幅度分别为 3.26 °C 和 4.50 °C。③该研究可为光伏电场对局地环境影响评价的相关研究提供借鉴, 并建议从无云时间序列 LST 构建, 光伏电场增/降温幅度的分离, 不同下垫面光伏电场对邻域 LST 空间分布特征的影响范围、程度与归因分析等方面进行深入研究。

关键词: 环境影响评价; 地表温度; 太阳能光伏; Landsat

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0158-11

0 引言

与煤炭、石油、天然气等化石能源不同, 太阳能光伏发电技术具有清洁安全、永续可再生和取用方便的优势^[1], 其产业在全球范围的发展, 有望改变自工业革命以来以化石能源为基础的能源生产和消费方式, 能有效缓解能源危机、全球碳排放和环境污染^[2-5]。近年来, 中国光伏产业在多样化政策激励下发展迅速, 在 2013 年和 2015 年我国相继超越意大利和德国, 成为全球光伏发电装机量最多的国家^[6-7]。据国家能源局统计, 截至 2020 年上半年, 中国大陆的光伏发电装机容量达到 2.16 亿 kW, 其中大型集中并网式电站装机占 69% 以上。

然而, 大型光伏电场工程的建设不可避免地对所在区域的土地、生态以及能量循环等产生特定的

环境效应^[8-11]。大型光伏电场工程在建设时对环境的影响与其他工业制造过程类似, 例如, 平整土地、构筑新结构等工程活动直接作用于土壤、植被、地貌和土地利用, 使其原有的形态发生变化, 甚至可能会破坏原有环境要素的稳定结构, 造成土地扰动、植被破坏和水土流失等问题; 电磁干扰、固体废弃物污染等也是光伏电场工程环境影响评估的重要内容^[9-12]。同时, 作为光伏电场核心的太阳能光伏阵列在建成投产后, 一方面吸收短波辐射将太阳能转换为电能, 另一方面向外辐射长波辐射改变了局部地表的能量流动方式, 形成热环境效应^[13]。即使热环境效应尚未纳入常规的光伏电场建设的环境影响评价体系, 但是该热环境效应会影响光伏系统的工作温度, 进而影响光伏的发电效率, 研究表明较低的光伏电池或模块的工作温度可提高发电效率^[14]。另外, 光伏电场产生的热环境效应改变了原有的地

收稿日期: 2020-12-01; 修订日期: 2021-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目“风电场对不同草地类型地表温度和蒸散发的影响研究”(编号: 41601598)和山东省高等学校大学生创新创业训练计划项目“浮岛光伏电场对地表温度的影响研究”(编号: S201910451159)共同资助。

第一作者: 伯英杰(1997-), 女, 硕士, 主要从事遥感应用研究。Email: yingjiebo@foxmail.com。

通信作者: 李国庆(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事可再生能源对环境的影响研究。Email: ligqing@foxmail.com。

表辐射、反照率和蒸散发状态,对不同下垫面的局部气候和生态系统功能产生影响^[13,15]。地表温度(land surface temperature, LST)是研究地表热环境的重要因素,在大规模、连续性的长时间序列研究具有独特优势的遥感观测法已成为主要的热环境评价方法之一^[16-17]。因此,采用遥感技术研究大型光伏电场工程建设的热环境对光伏发电产业的环境影响评估和当地环境保护具有重要意义。

目前,光伏电场对局地热环境的影响主要集中在干旱荒漠区。已有研究表明,光伏电场对以干旱荒漠地带为典型的大规模建设区的地表热环境产生影响:野外观测与遥感观测均发现干旱荒漠区的光伏电场具有降温效应,主要发生在白天^[18-19],其影响范围约为100~600 m^[20-21]。近年来,随着光伏产业规模的不断扩大,继荒漠、草原和居民屋顶之后,闲置水面成为建设光伏电场的可利用环境之一,为我国新能源和清洁生产的发展探索了新的开发模式和领域^[22]。然而,由于下垫面性质与以往干旱区光伏电场不同,浮岛光伏电场对建设区及其周围环境的LST空间分布特征的影响尚不明晰,判断光伏电场对局地温度的影响模式、空间范围和变化幅度均没有进行有效的分析。鉴于此,本研究以目前全球最大的浮岛光伏电场之一的安徽省淮南市典型浮岛光伏电场为研究区,为了明晰浮岛光伏电场对周围LST的影响,开展以下研究:①基于Google Earth Engine(GEE)在线云平台 and Landsat8 遥感影像,采用单通道算法提取典型浮岛光伏电场及其邻近区域的LST,建立LST数据集;②利用LST数据集,判断光伏电场对LST空间分布特征的影响模式;③在此基础上,明确光伏电场对LST空间分布特征影响的空间尺度和增/降温能力。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省淮南市谢家集区,地处亚热带与暖温带的过渡带,属暖温带半湿润季风气候区,夏季高温多雨、冬季寒冷干燥;全年日照时数为2 000 h左右,光照充足;年太阳辐射量在4 800 MJ/m²附近,太阳能资源丰富。近年来,当地依托资源和政策优势,在采煤沉陷区的闲置水面规划和建设大规模的浮岛电场。本研究的浮岛光伏电场的位置如图1所示,选址于采煤塌陷区的闲置水面,采取水上发电、水下养殖的模式,总装机容量为20 MWp,是目前全球最大的浮岛光伏电场之一^[22]。该浮岛光伏电场于2015年11月开工建设,2016年3月正式并

网发电;2015年11月—2016年10月为光伏电场的稳定建设时段。一般来说,光伏电场对LST的影响范围在100~600 m以内^[20-21],因此,本研究大致以浮岛光伏电场为中心,面积为25 km²的区域为研究范围,划定光伏电场周围1 km的缓冲区作为光伏电场的潜在影响区。根据浮岛光伏电场工程的施工时间段,对照Landsat8和谷歌地球的历史影像,对光伏电场1 km范围内未发生类型变化的典型地物进行目视解译,最终得到总面积约为0.258 km²的浮岛光伏电场区以及水体、林地、耕地、裸地和建设用地。研究区如图1所示。



图1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of study area

1.2 数据源

1.2.1 遥感数据

为了尽可能多地获取无云遥感影像,提高数据的连续性,本研究使用GEE在线云平台获取研究区2013年3月—2019年2月“行-列号”为“121-38”和“121-37”的Landsat8遥感影像数据集(USGS Landsat8 Surface Reflectance Tier 1, ImageCollection ID, Landsat/LC08/C01/T1_SR),共292景。该数据集的空间分辨率为30 m,包含5个可见光与近红外(VNIR)波段和2个短波红外(SWIR)波段,这些数据经过大气校正处理后得到地表反射率数据;还有2个已被处理为亮度温度的热红外(TIR)波段和质量信息波段(pixel_qa)。

1.2.2 气候数据

地面台站逐月气温来源于中国气象数据网的地面气候资料月值数据集(<http://data.cma.cn>)。选取以浮岛光伏建设区为中心60 km缓冲区范围内2个气象台站的逐月平均气温,用于后续的分析,即寿县(距离光伏电场11 km)和蚌埠市(距离光伏电场58 km)。

2 技术路线与研究方法

2.1 技术路线

本文的技术路线如图2所示。首先,利用GEE

在线云平台检索 2013 年 3 月—2019 年 2 月全时段的 Landsat8 遥感影像,采用单通道算法提取研究区无云时间序列 LST 和逐月 LST ,通过计算逐月 LST 与气温之差 (LST_{s-a}) 以减小气温波动对 LST 的影响;然后,选取夏季和冬季的 LST_{s-a} ,计算它们在光伏电场建成前后的变化幅度以判断影响 LST 空间分

布的模式,再利用局部 Moran's I 方法进行空间自相关分析以明确光伏电场影响 LST 空间分布的范围;最后,在解译提取浮岛光伏电场周围典型地物的基础上,对 LST_{s-a} 进行变化幅度提取,分析光伏电场的增/降温能力,从而明确浮岛光伏电场在不同建设阶段对 LST 空间分布的影响程度。

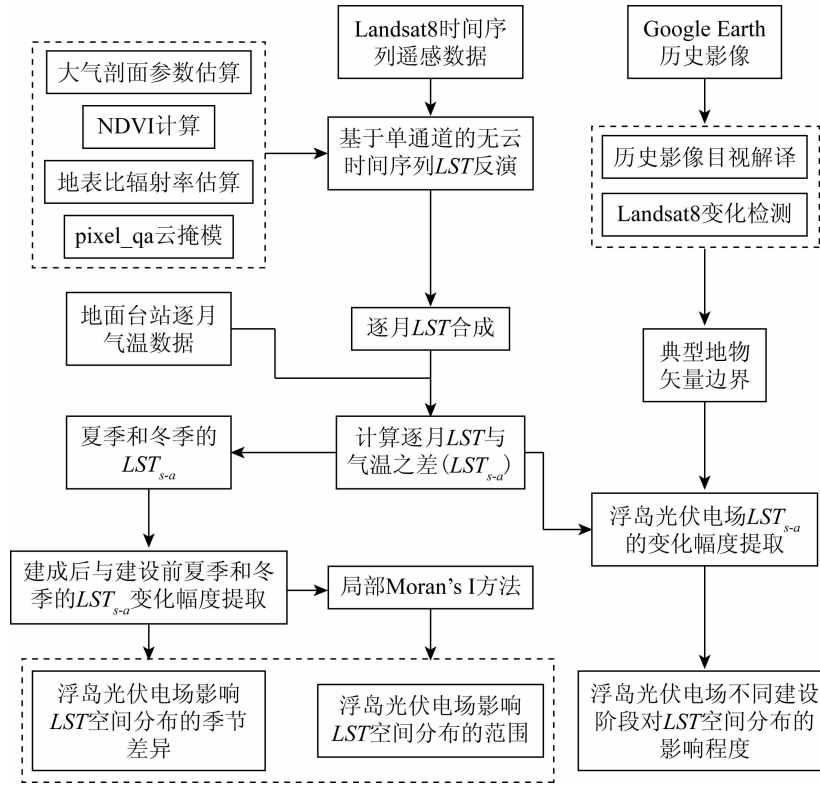


图 2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

2.2 研究方法

2.2.1 基于单通道算法的无云 LST 提取

由于 Landsat8 热红外波段 B11 (11.50 ~ 12.51 μm) 的杂散光噪声使该波段 LST 反演的精度较低^[23],因此本研究选择单通道算法 (single-channel algorithms, SC) 对 B10 (10.60 ~ 11.19 μm) 进行 LST 反演。在本研究中,使用 Jimenez-Munoz 等提出的经典单通道方法估算 LST ^[24-25]。该方法在保证反演精度的基础上简单易行,适用于 Landsat 数据长时间序列的 LST 反演,广泛应用于城市地表环境评估和人类活动影响评估^[26-28],其计算公式为:

$$LST = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{\text{sen}} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta, \quad (1)$$

$$\gamma \approx \frac{T_{\text{sen}}^2}{b_\gamma L_{\text{sen}}}, \quad \delta \approx T_{\text{sen}} - \frac{T_{\text{sen}}^2}{b_\gamma}, \quad (2)$$

式中: ε 为地表发射率; L_{sen} 为传感器端辐射亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); T_{sen} 为传感器亮度温度; B10 和 B11 的参数 b_γ 分别为: 1 324 K 和 1 199 K; ψ_1 , ψ_2 和 ψ_3 为大气函数。可利用下式获得,即

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau}; \psi_3 = L_d, \quad (3)$$

式中 τ , L_u 和 L_d 分别为大气透过率、上行辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 和下行辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),这些大气剖面参数可在网站 (<http://atm-corr.gsfc.nasa.gov/>) 上输入每幅遥感影像中心经纬度与成像时间信息并由 MODTRAN 模型估算获取^[29-30]。虽然地表比辐射率因不同地表结构的材料而不同,但仍可利用多光谱数据对不同土地覆盖条件建立查找表估算像元尺度的地表比辐射率^[25,31],公式为:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.99 & NDVI < 0.00 \\ 0.97 & 0.00 \leq NDVI < 0.15 \\ \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) & 0.15 \leq NDVI < 0.45 \\ 0.985 & NDVI \geq 0.45 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: 水体的地表发射率为 0.99; ε_s 为裸土 ($0.05 \leq NDVI < 0.15$) 的地表发射率 0.97; ε_v 为均匀植被 ($NDVI \geq 0.45$) 的地表比辐射率 0.985; P_v 为地表植

被覆盖度。 P_v 计算公式为:

$$P_v = \left(\frac{NDVI_i - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2, \quad (5)$$

式中: $NDVI_i$ 为像元的归一化植被指数; $NDVI_s$ 为裸土的 $NDVI$ 值,取值 0.15; $NDVI_v$ 为植被的 $NDVI$ 值,取值 0.45。 $NDVI$ 的计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}, \quad (6)$$

式中 ρ_{NIR} 和 ρ_R 分别为近红外波段和红光波段的地表反射率。

为了在统计分析中减少云对 LST 的影响,本研究将 pixel_qa 波段用于过滤云像素,得到逐景影像的无云 LST ,再计算 2013 年 3 月—2019 年 2 月逐月平均 LST 用于后续的统计分析(由于云量过多,缺少 2014 年 4 月、2014 年 7 月和 2015 年 5 月的数据)。另外,本文研究浮岛光伏电场不同建设状态(建成后与建设前)同时期的无云 LST 差异,并不严格要求 LST 计算的绝对精度,因此该算法的误差对本研究的影响基本可以忽略。

2.2.2 浮岛光伏电场对 LST_{s-a} 的影响范围与季节差异

为了判断浮岛光伏电场对 LST 的影响范围和季节差异,以浮岛光伏建成后与建设前同时期的无云 LST 差异作为 LST 的变化幅度是识别该模式和程度的有效手段。然而,建设区 LST 的变化除了受地表覆盖差异的影响之外,主要受到地表能量平衡

(如太阳辐射和云量)的控制和人类活动因素(土地覆盖变化、地形的人为改变等)的影响^[32],直接将建成后与建设前的 LST 相减,其 LST 差异不能准确反映浮岛光伏电场对 LST 场的变化情况。所以,在分析的过程中,需要尽量剔除光伏电场之外的其他影响因素。为了尽量剔除人类活动对 LST 的影响,笔者选择了与光伏电场建设前土地覆盖类型一致且在研究时段内没有发生变化的水体作为参照。图 3 (a) 显示,伴随着气温波动,建设前某些时段的 LST 普遍高于其他年份同时期的 LST (如 2013 年),浮岛光伏电场建成前后的 LST 变化幅度存在不确定性,不能准确反映浮岛光伏建设区 LST 的变化情况。为了进一步剔除自然要素变化对 LST 的影响,考虑到太阳辐射、地形、地表覆盖等要素的差异所导致的 LST 的变化可以在气温上体现出来^[32-34],本研究构建 LST_{s-a} (逐月 LST 与对应月份的气温之差)在一定程度上消除自然要素变化对 LST 变化幅度的干扰。 LST_{s-a} 的计算公式为:

$$LST_{s-a} = LST_i - T_i, \quad (7)$$

式中: LST_i 为第 i 月的 LST ; T_i 为第 i 月的气温; 气温取以浮岛光伏建设区为中心 60 km 缓冲区范围内 2 个气象台站的平均值。通过构建 LST_{s-a} ,一定程度上消除气温变化对 LST 变化幅度的干扰(图 3 (b))。

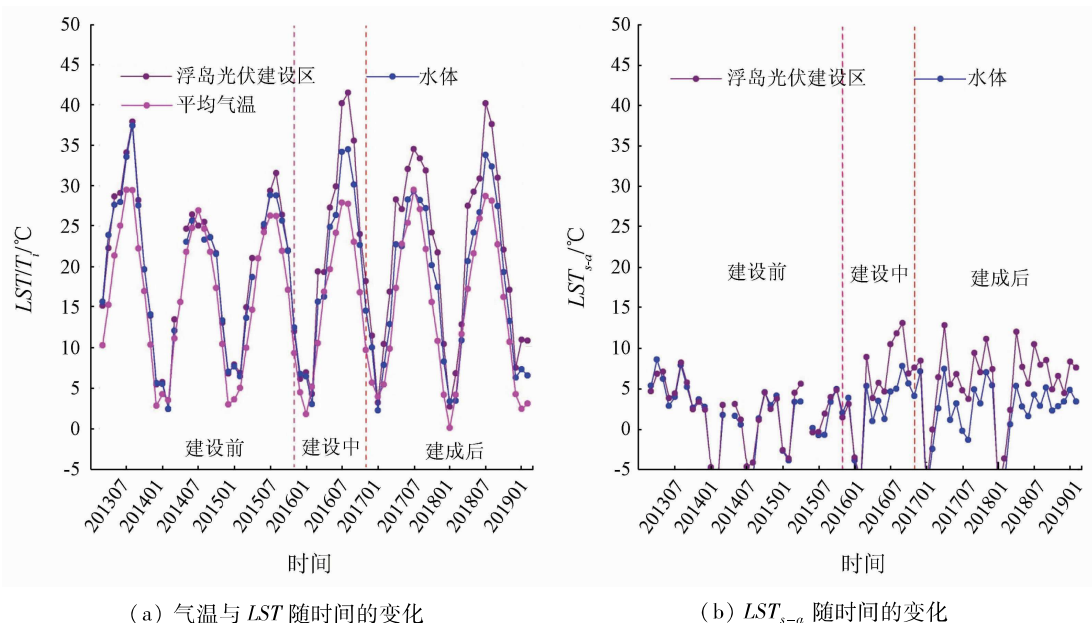


图3 气温及 LST 随时间的变化
Fig.3 Changes in temperature and LST over time

为了判断浮岛光伏电场对 LST 的影响模式,选取“夏季”和“冬季”2 个温度变化最为明显的季节进行对比分析。按照式(7)提取浮岛光伏电场建设区及其邻近区域夏季(6—8 月)、冬季(12 月—次年 2 月)的 LST_{s-a} ,计算浮岛光伏电场建成后与建设前

的 LST_{s-a} 差异。在此基础上,利用 ArcGIS 软件中的局部 Moran's I 来分析浮岛光伏电场对邻域的影响程度,进而判断光伏电场对 LST 的具体影响距离。

局部 Moran's I 是研究空间依赖关系的重要空间统计分析方法,它通过特定地点或区域的空间位

置与每个观测值的贡献来识别“集群”位置^[35-36]。同时,该指数在识别极端(高或低)值的空间格局时特别有效,从而使其对于评估 LST 的空间变化格局非常敏感^[37-39]。局部 Moran's I 取值在 $-1 \sim 1$ 之间, >0 表示正自相关,即表示要素具有包含同样高或同样低的属性值的邻近要素; <0 表示负自相关,即要素具有包含不同值的邻近要素;等于 0 则表示属性值是随机分布的。通过统计学上的显著性检验($P \leq 0.05$)的局部 Moran's I 有 4 种输出模式:高值(HH)聚类、低值(LL)聚类、高值主要由低值围绕的异常值(HL)以及低值主要由高值围绕的异常值(LH)^[37-39]。在本研究中,HH 模式代表 LST_{s-a} 变化幅度以高值为中心的空间集聚,LL 模式代表 LST_{s-a} 变化幅度以低值为中心的空间集聚,HL 模式代表 LST_{s-a} 变化幅度高值主要由低值围绕的异常值,LH 模式代表 LST_{s-a} 变化幅度低值主要由高值围绕的异常值,通过获取 LST_{s-a} 的高值(HH)聚类分布,进而得到光伏电场对 LST 的影响距离。需要说明的是,为了去除单一年份对分析结果造成的偏差,建成前、后的夏季 LST 分别取 2013—2014 年和 2017—2018 年夏季的平均值,建成前、后阶段的冬季 LST 分别取 2013—2014 年和 2017—2018 年冬季的平均值。

2.2.3 浮岛光伏电场不同建设阶段对 LST_{s-a} 的影响程度

为了明确浮岛光伏电场的增/降温能力,本研究利用 ArcGIS 软件的分区统计功能提取典型地物类型逐月 LST 与 LST_{s-a} 的平均值和标准差,分析浮岛光伏电场不同建设阶段对 LST 的影响。需要注意的是,典型土地利用类型是结合 Google Earth 的历史影像与无云 Landsat8 影像无变化区域进行目视解译得到的。根据浮岛光伏工程的施工时间段,选取 2013 年 9 月和 2018 年 9 月无云覆盖的 Landsat8 地表反射率影像,利用 ENVI 软件提供的 Spectral Angle Difference 变化检测方法得到未变化区域;再对照 Google Earth 的历史影像,对光伏电场 1 km 范围内未变化区域的典型地物进行目视解译。

3 结果与分析

3.1 浮岛光伏电场对 LST_{s-a} 影响的范围与季节差异

夏季和冬季,浮岛光伏电场对 LST 的影响存在增温效应。如图 4(a)和(b)所示,夏季,原来的水体对照区和未建浮岛光伏电场前的水体区域形成的“冷岛”区域被切断,在浮岛光伏电场建设区形成温暖区域;浮岛光伏电场的建设明显增加了其占地范围

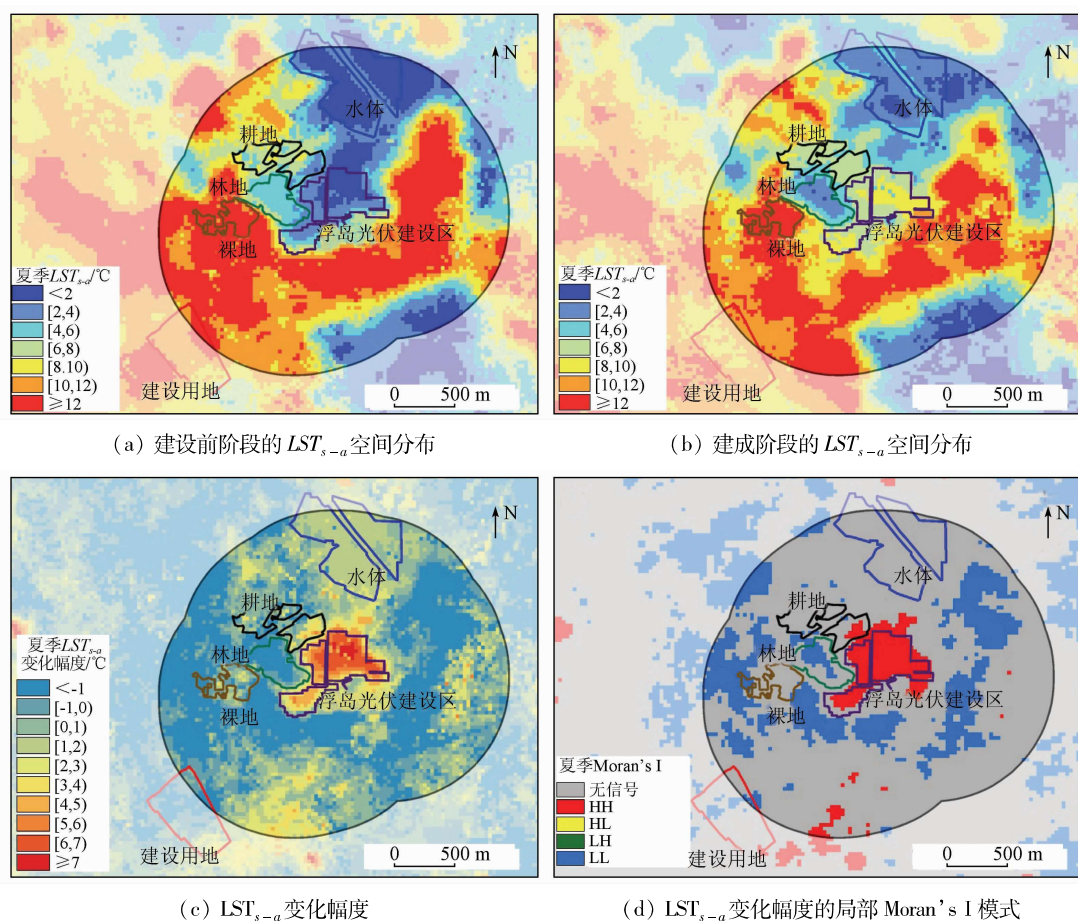


图4 夏季浮岛光伏电场对 LST_{s-a} 空间分布的影响

Fig.4 Influence of the floating solar park on the spatial distribution of LST_{s-a} in summer

内的 LST (图 4(c)), LST_{s-a} 最大增温幅度超过 7°C , LST_{s-a} 平均增温幅度也能达到 4.9°C 。林地范围的 LST 有所降低, LST_{s-a} 平均降幅达 1.1°C , 形成了一个局部低温中心; 耕地靠近浮岛光伏电场的边缘部分的区域 LST 有所升高, LST_{s-a} 增温幅度在 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$, 远离浮岛光伏电场温暖区的耕地 LST 无明显变化; 裸地受林地阻挡, 其 LST 无明显变化。由局部 Moran's I (图 4(d)) 得知, 夏季浮岛光伏电场的 LST 符合 HH 模式, 对邻近区域的增温作用集中在其 200 m 以内区域, 主要为与浮岛光伏电场毗邻的北部的建设区水域、西部的耕地以及东南部的水陆

边缘。

冬季, 浮岛光伏电场的建立增加了其占地范围内的 LST (图 5), LST_{s-a} 平均增温幅度为 3.5°C , 较夏季增温幅度小; 原来的水体对照区和未建浮岛光伏电场前的水体区域形成的“冷岛”区域被切断, 在浮岛光伏电场建设区形成温暖区域; 浮岛光伏电场建设区与林地、耕地的 LST 连成一片; 裸地受林地阻挡, 其 LST 无明显变化。由局部 Moran's I (图 5(d)) 可知, 冬季浮岛光伏电场增温作用较夏季弱, 仅停留在浮岛光伏电场建设区及其 200 m 范围内的水域。

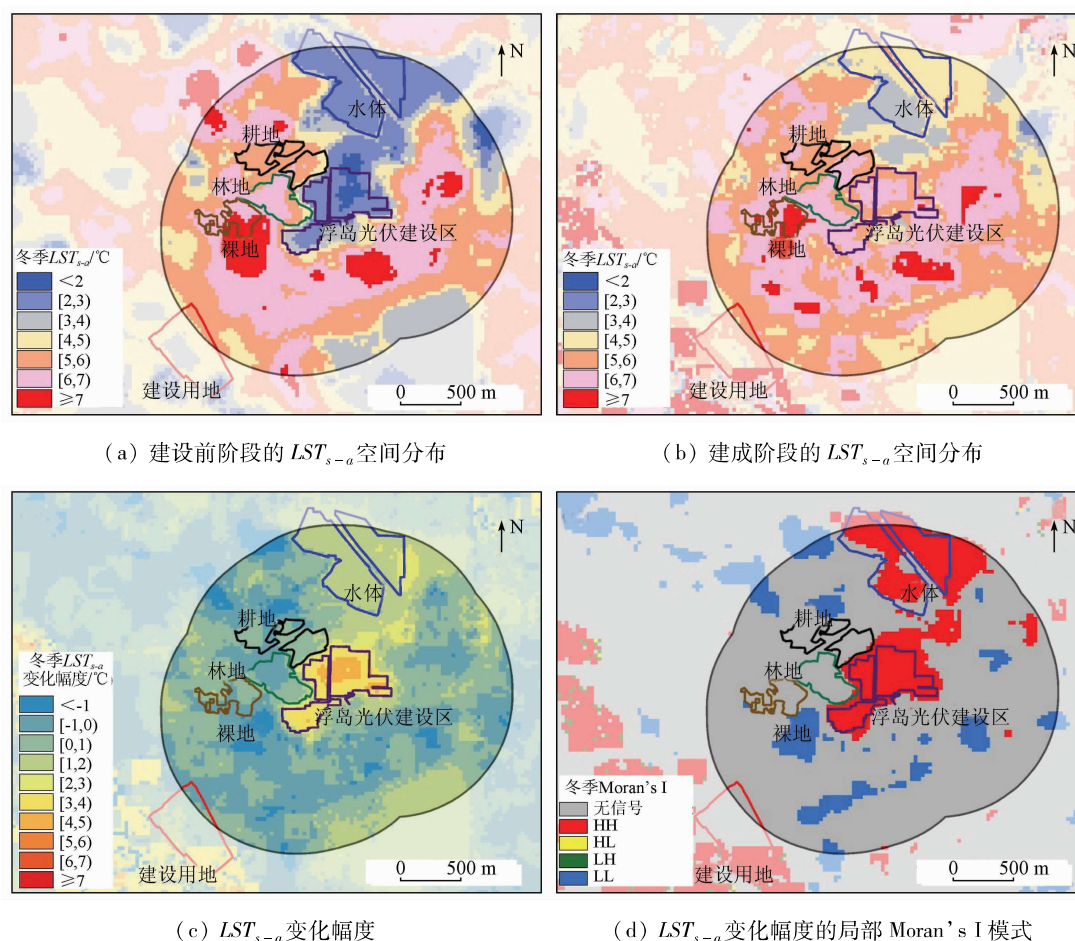


图 5 冬季浮岛光伏电场对 LST_{s-a} 空间分布的影响

Fig. 5 Influence of the floating solar park on the spatial distribution of LST_{s-a} in winter

3.2 浮岛光伏电场不同建设阶段对 LST_{s-a} 的影响程度

基于单通道算法提取了研究区典型地物的逐月平均 LST , 再根据浮岛光伏电场工程的建设周期, 得到建设前阶段 (2013 年 3 月—2015 年 10 月)、建设阶段 (2015 年 11 月—2016 年 10 月) 和建成阶段 (2016 年 11 月—2019 年 2 月) 的 LST 变化曲线 (图 6)。浮岛光伏电场建设前阶段, 拟建设区与水体区域同为采煤塌陷区的低洼积水塘, LST 的变化曲线一致, 且月平均 LST 为最低 (分别为 20.2°C 和 19.6°C); 其余由低到高依次为林地、耕地、建设

用地和裸地。浮岛光伏电场建设阶段和建成阶段, 建设区的月均 LST 普遍高于水体, 接近于林地的 LST , 甚至在某些时段与建设用地的 LST 相当。根据局部 Moran's I 的结果, 浮岛光伏电场对 LST 的影响范围主要集中在建设区 200 m 范围内, 对其周围典型地类的增温效应非常微弱。因此, 可以采用建设区的 LST_{s-a} 变化幅度来明确浮岛光伏电场不同建设阶段的增温能力。图 7 为浮岛光伏电场不同建设阶段的 LST_{s-a} 变化, 其中建设前阶段的 LST_{s-a} 取 2013 年 3 月—2015 年 2 月的平均值, 建设阶段的 LST_{s-a} 取 2015 年 11 月—2016 年 10

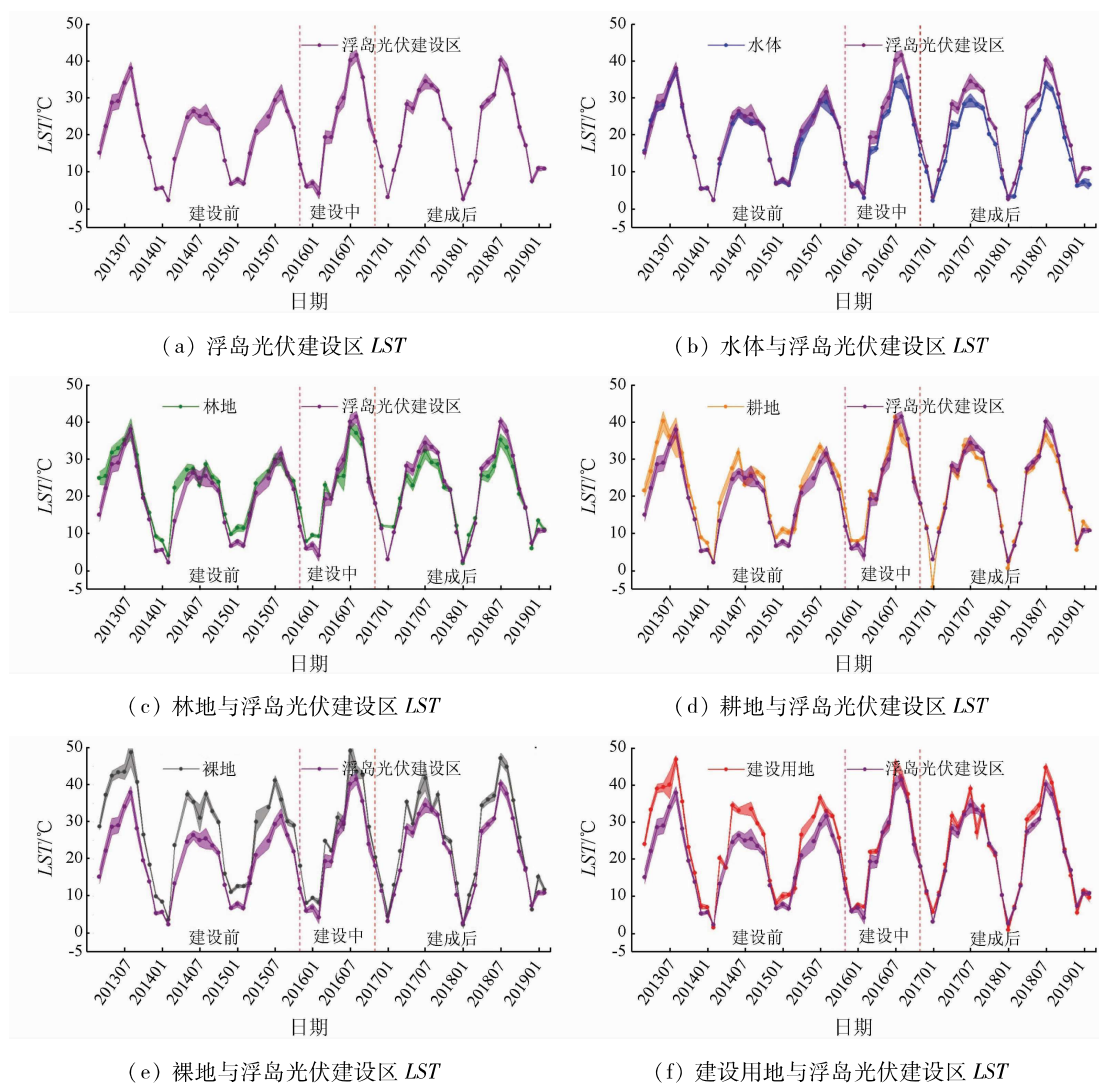


图6 浮岛光伏电场不同建设阶段的逐月 LST 变化曲线 (阴影部分为 LST 的标准差)

Fig. 6 Monthly LST curve of the floating solar park in different construction stages

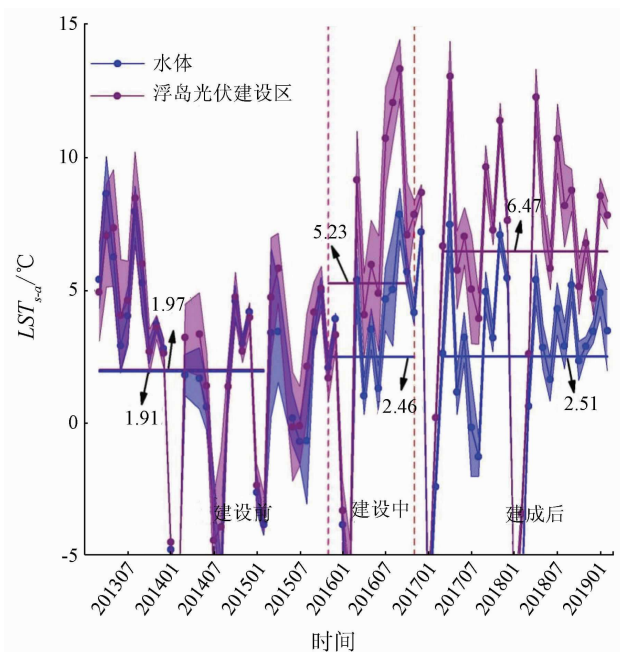


图7 浮岛光伏电场不同建设阶段的 LST_{s-a} 变化

Fig. 7 Changes in LST_{s-a} before and after the construction of the floating solar park

月的平均值,建成阶段的 LST_{s-a} 取 2017 年 3 月—2019 年 2 月的平均值,阴影部分为 LST 的标准差。

结果显示,浮岛光伏电场建设前,拟建设区与水体的年均 LST_{s-a} 差别很微弱,仅为 0.06°C ;建设阶段差异逐渐增大(2.77°C);而浮岛光伏电场建成后,二者的年均 LST_{s-a} 之差达到了 3.96°C 。在浮岛光伏电场建设区,建设阶段的年均 LST_{s-a} 之差为 3.26°C ,建成后与建设前的年均 LST_{s-a} 之差为 4.50°C ,而水体区域仅为 0.55°C ,这说明了浮岛光伏电场的建设使建设区低洼积水塘的年均 LST 升高了 4.50°C 。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于 Landsat8 时间序列遥感数据,利用单通道算法提取了淮南市典型浮岛光伏电场及其邻近区域的 LST 数据集,对光伏电场影响 LST 空间分布的模式和影响的范围进行了分析,并明确了建设区不同建设阶段对 LST 空间分布的影响程度。主要结论为:

1) 浮岛光伏电场的建设明显改变了建设区的热环境,在温度变化最明显的夏季和冬季都存在增温效应,其中夏季的平均增温幅度达到 4.9°C ,冬季平均增温幅度则为 3.5°C 。增温效应主要集中在建设区 200 m 范围内,对其周围典型地类的增温效应非常微弱。

2) 浮岛光伏电场建设阶段和建成阶段,建设区的月均 LST 普遍高于水体,接近于林地的 LST ; 2个阶段的年均增温幅度分别为 3.26°C 和 4.50°C 。

4.2 讨论

本文对浮岛光伏电场不同建设阶段及建成前后不同季节的热环境变化进行分析,结果表明浮岛光伏电场对建设区及其邻近 200 m 以内具有增温效应,其增温幅度夏季大于冬季,同时为光伏电场对局地环境影响评价的相关研究提供了借鉴。然而, LST 受诸多因素影响,其变化是复杂的,存在众多不确定性的问题,这对光伏电场的热环境效应评估提出了新的挑战。

1) 无云时间序列 LST 构建。大范围云盖的存在对Landsat8影像 LST 反演带来挑战,一方面降低了 LST 的准确度,另一方面减少了 LST 时间序列的连续性,这些都为后续光伏电场 LST 的统计分析带来偏差。为了减少这一偏差,以往的研究通常在 LST 反演前进行数据筛选,即整幅影像的云量在一定阈值以内^[18,20]。但是这样的筛选容易造成漏选研究区的无云遥感影像,也容易减少 LST 时间序列的连续性。实际上,笔者也曾考虑过利用时间分辨率较优的MODIS LST 产品用于分析光伏电场的热环境变化,但受限于MODIS较低的空间分辨率(1 km),光伏电场的面积尚不足MODIS产品的一个像元,不能像Landsat8数据一样展现更多的 LST 空间细节,更不能很好地分析光伏电场对 LST 的影响范围。综合时间连续性和空间分辨率,本研究利用GEE在线云平台获取研究区全时段的Landsat8数据集,将pixel_qa波段用于过滤云像素,得到逐景影像的无云 LST ,再计算逐月平均 LST 用于后续的统计分析;在确保 LST 精度的前提下,可以有效增加 LST 时间序列的连续性。然而,由于云量过多,月尺度下的 LST 仍然存在缺失。在后续的研究中,可以考虑引入Savitzky-Golay滤波、HANTS(harmonic analysis of time series)^[40-41]等时间序列重建方法构建Landsat无云时间序列 LST 。

2) 光伏电场增/降温幅度的分离。由于 LST 受到地表能量平衡等自然要素的控制和人类活动因素的影响^[32-34],光伏电场建成前后的 LST 差值不能准确反映增/降温幅度。考虑到太阳辐射、地形、地表

覆盖等要素的差异所导致的 LST 的变化可以在气温上体现出来,本研究计算逐月 LST 与对应月份的气温之差(LST_{s-a})以减少光伏电场之外的其他因素对 LST 的干扰,气温取以浮岛光伏建设区为中心 60 km 缓冲区范围内2个气象台站的平均值。当然,本文的计算方法并不能完全消除自然要素和人类活动对 LST 的影响。 LST_{s-a} 中,气温取以浮岛光伏建设区为中心 60 km 缓冲区范围内2个气象台站的平均值,与每个Landsat像元相比较,空间分辨率确实很低,也会存在误差。该方法对不同下垫面,特别是异质性较强或土地利用类型易于改变的地表,适用性尚不清晰,仍需深入研究。在后续的研究中,将进一步考虑采用气候学模型和实地观测的方法,使得结果更加准确。

3) 不同下垫面光伏电场热环境效应对邻域的影响范围、程度与归因分析。本文的光伏电场位于漂浮水面,它对建设区及其邻近 200 m 以内具有增温效应,但不同下垫面光伏电场影响 LST 空间分布的模式及影响范围、程度存在差异,不同地形条件的荒漠区表现不同的降温、增温效应^[19-20,42-43]。例如,青海共和盆地荒漠区大型光伏电站的白天 LST 年均下降幅度为 4°C ^[40];甘肃省金昌市西坡戈壁光伏电场白天 LST 年均下降幅度为 0.65°C ^[21]。此外,光伏电场影响 LST 空间分布的驱动机制尚不明晰。在后续研究中,应发展优化适用于不同下垫面条件的光伏电场自动化遥感提取方法,并考虑结合地面观测、遥感观测与能量平衡模型对光伏电场影响 LST 空间分布的模式进行综合分析。

参考文献(References):

- [1] Parida B, Iniyar S, Goic R. A review of solar photovoltaic technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3): 1625-1636.
- [2] International Energy Agency. Global gaps in clean energy R&D; Update and recommendations[M]. Paris: International Energy Agency, 2010: 1-35.
- [3] Itrpv I. International technology roadmap for photovoltaic results 2017[M]. Frankfurt: VDMA Photovoltaic Equipment, 2020: 1-72.
- [4] Schmela M, Masson G, Mai N N T. Global market outlook for solar power 2016-2020[M]. Belgium: Solar Power Europe, 2016: 1-38.
- [5] International Energy Agency. Renewables 2019[M]. Paris: International Energy Agency, 2019: 1-106.
- [6] Li L, Chi T, Zhang M, et al. Multi-layered capital subsidy policy for the Pv industry in China considering regional differences[J]. Sustainability, 2016, 8: 45.
- [7] 朱向东, 贺灿飞, 毛熙彦, 等. 贸易保护背景下中国光伏产业空间格局及其影响因素[J]. 经济地理, 2018, 38(3): 98-105.

- Zhu X D, He C F, Mao X Y, et al. The spatial pattern of China Pv industry under the background of trade protectionism[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(3): 98–105.
- [8] Shuang L, Weigand J, Ganguly S. The potential for climate impacts from widespread deployment of utility – scale solar energy installations: An environmental remote sensing perspective[J]. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 2017, 6(1): 1000190.
- [9] 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 Z Y, Wang J, Gao Y, 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.
- [10] 吴菲. 光伏发电站环境影响评价技术规范研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- Wu F. Study on technical specifications for environmental impact assessment of photovoltaic power station [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012.
- [11] 周茂荣, 王喜君. 光伏电站工程对土壤与植被的影响——以甘肃河西走廊荒漠戈壁区为例[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(2): 132–138.
- Zhou M R, Wang X J. Influence of photovoltaic power station engineering on soil and vegetation: Taking the Gobi desert area in the Hexi corridor of Gansu as an example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2): 132–138.
- [12] 郭丹. 光伏发电现状及其环境效应分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- Guo D. Photovoltaic power generation and its environmental effects analysis [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [13] 李芬, 杨勇, 赵晋斌, 等. 光伏电站建设运行对气候环境的能量影响[J]. *气象科技进展*, 2019, 9(2): 71–77.
- Li F, Yang Y, Zhao J B, et al. Review on energy impact of photovoltaic power station construction and operation on climate and environment[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 9(2): 71–77.
- [14] Bayrakci M, Choi Y, Brownson J R. Temperature dependent power modeling of photovoltaics [J]. *Energy Procedia*, 2014, 57: 745–754.
- [15] Pimentel Da Silva G D, Magrini A B, David A C. A multicriteria proposal for large – scale solar photovoltaic impact assessment[J]. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2019, 38(1): 3–15.
- [16] Wang S M, Luo X B, Peng Y D. Spatial downscaling of MODIS land surface temperature based on geographically weighted autoregressive model [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2532–2546.
- [17] Liou Y A, Nguyen A K, Li M H. Assessing spatiotemporal eco – environmental vulnerability by Landsat data [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 80: 52–65.
- [18] 李彦甫. 基于高分辨率影像的光伏电场信息提取鲁棒性分析及其热环境效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- Li Y F. Robustness of photovoltaic electric field information extraction based on high – resolution image and its thermal environment effect [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [19] 杨丽薇, 高晓清, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(9): 2160–2166.
- Yang L W, Gao X Q, Lyu F, et al. Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of Golmud [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(9): 2160–2166.
- [20] 刘哲, 杨华, 陈星宇, 等. 光伏电场对地表温度的影响分析[J]. *地理空间信息*, 2019, 17(10): 20–23, 10.
- Liu Z, Yang H, Chen X Y, et al. Impact analysis of solar park on land surface temperature [J]. *Geospatial Information*, 2019, 17(10): 20–23, 10.
- [21] 李国庆, Armstrong Alona, 刘哲. 光伏电场对地表温度的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(12): 117–123.
- Li G Q, Armstrong A, Liu Z. Effect of solar power plants on land surface temperature [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(12): 117–123.
- [22] Pouran H M. From collapsed coal mines to floating solar farms, why China’s new power stations matter [J]. *Energy Policy*, 2018, 123: 414–420.
- [23] Cook M, Schott J R, Mandel J, et al. Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 11244–11266.
- [24] Jiménez – Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single – channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108: D22.
- [25] Jiménez – Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat8 thermal infrared sensor data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840–1843.
- [26] Eldesoky A H M, Gil J, Pont M B. The suitability of the urban local climate zone classification scheme for surface temperature studies in distinct macroclimate regions [J]. *Urban Climate*, 2021(37): 100823.
- [27] Wang Y, Ni Z, Hu M, et al. A practical approach of urban green infrastructure planning to mitigate urban overheating: A case study of Guangzhou [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(287): 124995.
- [28] Firozjaei M K, Sedighi A, Firozjaei H K, et al. A historical and future impact assessment of mining activities on surface biophysical characteristics change: A remote sensing – based approach [J]. *Ecological Indicators*, 2021(122): 107264.
- [29] Barsi J, Schott J, Palluconi F, et al. Validation of a web – based atmospheric correction tool for single thermal band instruments [M]. SPIE, 2005.
- [30] Barsi J A, Barker J L, Schott J R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth – sensing instrument [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003.
- [31] Sobrino J A, Jiménez – Muñoz J C, Soria G, et al. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors [J]. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 316–327.
- [32] Vancutsem C, Ceccato P, Dinku T, et al. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different

- ecosystems over Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(2): 449–465.
- [33] 韩秀珍, 李三妹, 窦芳丽. 气象卫星遥感地表温度推算近地表气温方法研究[J]. 气象学报, 2012, 70(5): 1107–1118.
- Han X Z, Li S M, Dou F L. Study of obtaining high resolution near-surface atmosphere temperature by using the land surface temperature from meteorological satellite data[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(5): 1107–1118.
- [34] 姚永慧, 张百平, 韩芳. 基于MODIS地表温度的横断山区气温估算及其时空规律分析[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 917–927.
- Yao Y H, Zhang B P, Han F. MODIS-based air temperature estimation in the Hengduan Mountains and its spatio-temporal analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 917–927.
- [35] Anselin L. Local indicators of spatial association—Lisa[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93–115.
- [36] Kan A K, Li G Q, Yang X, et al. Ecological vulnerability analysis of Tibetan towns with tourism-based economy: A case study of the Bayi District[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(5): 1101–1114.
- [37] 孟丹, 王明玉, 李小娟, 等. 京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1545–1558.
- Meng D, Wang M Y, Li X J, et al. The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1545–1558.
- [38] Bartesaghi-Koc C, Osmond P, Peters A. Spatio-temporal patterns in green infrastructure as driver of land surface temperature variability: The case of Sydney[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 83: 101903.
- [39] Fan C, Wang Z. Spatiotemporal characterization of land cover impacts on urban warming: A spatial autocorrelation approach[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1631.
- [40] 吴迪, 陈健, 石满, 等. 基于Savitzky-Golay滤波算法的FY-2F地表温度产品时间序列重建[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(2): 59–65. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 02. 09.
- Wu D, Chen J, Shi M, et al. Reconstruction of land surface temperature time-series datasets of FY-2F based on Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(2): 59–65. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 02. 09.
- [41] 徐永明, 覃志豪, 沈艳. 长江三角洲地区地表温度年内变化规律与气候因子的关系分析[J]. 国土资源遥感, 2010(1): 60–64. doi:10.6046/gtzyyg. 2010. 01. 10.
- Xu Y M, Qin Z H, Shen Y. The relationship between inter-annual variations of land surface temperature and climate factors in the Yangtze River Delta[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(1): 60–64. doi:10.6046/gtzyyg. 2010. 01. 10.
- [42] Chang R, Shen Y B, Luo Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the Barren area of Gonghe, China[J]. Renewable Energy, 2018, 118: 131–137.
- [43] 殷代英, 马鹿, 屈建军, 等. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 15–21.
- Yin D Y, Ma L, Qu J J, et al. Effect of large photovoltaic power station on microclimate of desert region in Gonghe Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 15–21.

Impacts of floating solar parks on spatial pattern of land surface temperature

BO Yingjie^{1,2}, ZENG Yelong³, LI Guoqing¹, CAO Xingwen⁴, YAO Qingxiu¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: With the rapid development of China's photovoltaic industry in recent years, the assessment of the impacts of the large-scale solar parks on the environment is greatly significant for guiding the healthy development of the photovoltaic industry. The changes in the local thermal environment induced by solar parks have attracted the attention of researchers at home and abroad. Floating solar parks (also known as floating-on-water solar parks) serve as a new development mode of photovoltaic power generation in recent years. However, their impacts on the spatial pattern of land surface temperature(LST) are currently unclear. Using the single-channel algorithm, this study extracted the LST dataset of the floating solar park in Huainan City and its adjacent areas from Landsat8 time-series remote sensing data. Then, this study determined the differences between monthly LST and air temperature of the corresponding month (LST_{s-a}) and analyzed the influencing mode and scopes of floating solar parks on the spatial pattern of LST, as well as their seasonal differences. Finally, this study ascertained the influencing degrees of different construction stages on LST in the construction area. The results are as follows. ① The construction of the floating solar park significantly changed the thermal environment of the construction area, and warming effect occurred during both summer and winter when the temperature changes the most appearantly. Moreover, the

warming effect mainly concentrated with 200 m of the construction area, while being very weak in typical surrounding land cover. ② During the construction and the completion phases of the floating solar park, the average monthly LST in the construction area was generally higher than that of the water body and was close to that in the forest. The average annual LST increased by 3.26 °C and 4.50 °C, respectively in the construction and the completion phases. ③ This study can serve as a reference for the related research on assessing the impacts of the floating solar parks on the local environment. The authors recommended conducting an in – depth study from the aspects of the construction of cloudless time – series LST datasets, the separation of the increased/decreased amplitude of the temperature induced by floating solar parks, and the influencing scope and degrees and the genesis analysis of the distribution pattern of LST on the different types of land cover in a floating solar park and its adjacent areas.

Keywords: environmental impact assessment; land surface temperature (LST); solar photovoltaic power generation; Landsat

(责任编辑: 李 瑜)