

省域水上光伏发电潜力分析评估方法及应用

宋福龙¹, 陈晨^{1*}, 张雯悦², 彭玲², 赵帅军³, 车延博³, 陈德跃²

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京市 朝阳区 100101;

3. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津市 南开区 300072)

Method for Potential Analysis and Evaluation of Water PV Power Generation Within a Province

SONG Fulong¹, CHEN Chen^{1*}, ZHANG Wenyue², PENG Ling², ZHAO Shuaijun³, CHE Yanbo³, CHEN Deyue²

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Chaoyang District, Beijing 100101, China;

3. Key Laboratory of Smart Grid of Education Ministry, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

Abstract: Development of distributed photovoltaics are an important way to achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality under the condition of land resources shortage. As an innovative distributed photovoltaic development method in recent years, photovoltaic on water has received extensive attention. Current policy has also made detailed regulations on the exploitation of photovoltaic on water project. This paper proposes a method for evaluating the potential of photovoltaic power generation on water based on remote sensing information, which aims to provide a new tool for scientific demonstration and accurate evaluation of photovoltaic power generation resources and project exploitation on water. Based on the open remote sensing image processing platform, this method obtains remote sensing images, calculates the water body index, determines the threshold value by the OTSU method and extracts the entire water body area. The area is reduced step by step according to various influencing factors using the mapping tool ArcMap. By dividing the water body into several grids, the area of the water body that can be installed with photovoltaics and the configurable installed capacity of photovoltaics in each grid are then calculated. Then, combined with the solar radiation data of typical meteorological years, the photovoltaic power generation potential on water is obtained. Finally, the potential of photovoltaic power generation on water under different

development rates is calculated. As an example, this method is used to evaluate the potential of photovoltaic power generation on water of Jiangsu Province. The paper provides a technical means to evaluate the potential of photovoltaic power generation on water in the province.

Keywords: remote sensing image processing platform; MNDWI; water body information extraction; PV on water; PV installed capacity

摘要: 分布式光伏是土地资源紧张条件下推进“双碳”目标实现的重要途径。水上光伏作为近年来一种创新的分布式光伏开发方式受到了广泛关注, 现行政策也对水上光伏开发做出了细致管理规定。提出一种基于遥感信息的水上光伏发电潜力评估方法, 旨在为水上光伏发电资源与项目开发的科学论证和精准评估提供一种手段。方法基于开放的遥感影像处理平台获取遥感影像并计算水体指数, 通过大津法确定阈值、提取全部水体面积, 并利用制图工具ArcMap按照各项影响因素对水面面积逐级折减; 然后将水体划分成若干网格, 计算各网格内可安装光伏水体面积和可配置光伏装机容量; 结合典型气象年太阳辐射数据得到水上光伏发电潜力; 最后, 计算不同开发率下水上光伏发电潜力。以江苏省为例进行了水上光伏发电潜力评估分析并进行了验证, 提供了一种在省域范围进行水上光伏发电潜力评估的技术手段。

关键词: 遥感影像处理平台; 修正的归一化差异水体指数; 水体信息提取; 水上光伏; 光伏装机容量

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目(建筑光伏发电潜力评估方法及实证研究)。

Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (Research on the Evaluation Method and Empirical Analyses of Building Photovoltaic Power Generation Potential).

0 引言

2020年中国提出了力争2030年前实现碳达峰,

2060年前实现碳中和的目标,意味着对太阳能、风能、水能等清洁能源发电的需求将大幅增长,能源结构将迎来巨变。根据国家统计局公布数据^[1],截至2021年末,全国发电装机容量中,火电占比仍达到55%,并网太阳能发电占比不到13%,分布式光伏发电装机更是仅有太阳能发电总装机的30.7%^[2],发展空间巨大。因地制宜发展分布式光伏发电,将成为部分人口众多、土地资源稀缺、电力负荷较大的地区推动“双碳”目标实现的重要举措。近年来,在东中部水系发达地区,水上光伏发电成为区域分布式清洁能源的创新型开发方式之一。

研究数据显示,全球水上光伏可利用面积约为40.45万km²,呈现出总量巨大、空间分布不均衡的特点^[3]。中国东中部水资源丰富,具备开发水上光伏项目的先决条件。目前已有的水上光伏项目开发模式主要包括水上漂浮模式、渔光互补模式、水上+采煤沉陷区模式、光伏水利模式^[4]。渔光互补即水上发电、水下养殖,具有土地利用率高、收益高、节能环保等优点^[5],是目前应用较为广泛的一种模式。但受水体面积、项目成本、评估方法等因素限制,目前水上光伏项目主要为小规模应用^[6],如江苏宝应生态渔业光伏项目、安徽淮南采煤沉陷区水面光伏项目等。已报道的水上光伏发电相关研究主要也集中在个别项目或园区的生态环境影响和经济效益分析等方面。文献[7]分季节对不同光伏板覆盖率湖泊及周围水体做了水生生态指标监测分析,发现水上光伏电站可防止水体富营养化,且未导致水体重金属离子浓度升高;文献[8]从性能角度对水上光伏发电量和经济性进行了评估,水上光伏电站相比同条件地面电站,发电量高约5%~7%,但成本比地面电站高约5%~12%;文献[9]计算了TW新能源省级渔业精品园渔光互补项目光伏发电预计总发电量及减碳量等;文献[10]建立了渔光互补型光伏发电项目综合效益评价体系,并以射阳20 000 kW渔光互补型光伏发电项目为实例进行了综合效益评价。

对市域、省域或更大范围水上光伏发电资源潜力进行摸底调查,是支撑相关部门掌握当地水上光伏发电资源、统筹区域清洁能源多元化发展、科学制定区域清洁能源发展规划的重要手段。2022年5月,国家水利部出台相关政策^[11],对湖泊、水库建设光伏电站做出了细致规定,指出“在湖泊周边、水库库汉建设光伏、风电项目的,要科学论证,严格管控,不得布设在具有防洪、供水功能和水生态、水环境保护需求

的区域,不得妨碍行洪通畅,不得危害水库大坝和堤防等水利设施安全,不得影响河势稳定和航运安全”。水上光伏发展规划与项目开发亟须更加科学精准的评估方法作为支撑。

对于可利用水体面积的准确定位和分析计算是评估区域性水上光伏发电潜力的重要步骤,必须符合国家对于水上光伏资源开发的政策要求。遥感技术具有覆盖范围广、时空分辨率高等显著优势,在水资源监测领域有着广泛应用。近年来基于遥感影像提取水体方法发展快速,提取精度不断提高。文献[12]综合分析了利用遥感影像提取水体的几种方法。阈值法对水陆分界比较明显的湖泊及较大河流干流水体提取有较好效果;分类器法则利用了高分影像中的光谱、形状和纹理等影像信息,对细小水体的提取精度相对于阈值法来说更高;以深度学习为代表的其他方法主要针对对不同地区或不同影像数据产生的条件型算法,在某些条件下具有较好适用性。水体信息通常面积较大,表面颜色特征鲜明,并且具有明显的边界分异效应。本文选择对于水陆分界面区分有优势且在工作便捷性、高效性有相对优势的阈值法,并与其他几种常见计算方法进行对比实验。

阈值法中的水体指数法简单高效,是当前全球和大区域水体分布和面积估算采用的主要技术之一。文献[13]通过检索发现迄今已有22个光学卫星水体遥感指数,其中又以修正的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)、归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)应用最广。文献[14]利用多种水体指数对宁夏阅海湖水体信息进行提取,其中MNDWI的错分误差和漏分误差都较低,提取效果较好。文献[15]采用多种指数法对密云水库进行提取,其中基于哨兵2号(Sentinel-2)卫星影像的MNDWI提取效果最佳。文献[16]对比了不同环境背景下常用指数法和分类法水体信息提取精度,得出在城区背景中支持向量机(support vector machine, SVM)方法准确性最高,在非城区背景中MNDWI与SVM精度相当,SVM更适用于水体快速提取,MNDWI提取的山间细碎河流更为完整。

本文借鉴地面光伏、屋顶光伏等发电潜力评估方法,结合水上光伏特点,基于遥感影像提取水体信息,立足国家关于水上光伏开发政策,综合考虑多种影响因素,提出对省域水上光伏发电潜力进行快速评估的有效方法。以江苏省为例,计算省、市域水上光

伏可配置装机容量, 依据太阳能资源得到全省及各市水上光伏发电潜力。

1 研究区域与研究思路

本文选择江苏省作为研究区域。江苏省地跨北纬 $30^{\circ}45' - 35^{\circ}08'$, 东经 $116^{\circ}21' - 121^{\circ}56'$, 位于长江、淮河下游, 跨江滨海, 湖泊众多, 水网密布, 海陆相邻, 是全国唯一拥有大江大河大湖大海的省份。江苏省在南京、淮安、扬州等多地都已建成渔光互补项目。数据显示, 江苏省水上光伏建设项目数量居全国之最^[6]。

本文首先基于Google Earth Engine (GEE) 平台利用MNDWI指数法提取出江苏省内全部水体, 在此基础上提出对于水上光伏开发面积产生影响的涵盖政策、经济、技术等方面的因素体系, 对全部水体面积进行剔除和折减, 获得全省及各市可用水上光伏潜在水体面积。再以空间分辨率经度 $0.04^{\circ} \times$ 纬度 0.04° 格网为基本计算单元, 进行水上光伏发电装机配置的精细计算, 并结合太阳辐照数据对发电潜力进行分析评估。最后给出不同开发率下全省及各市的水上光伏发电潜力。整体研究思路如图1所示。

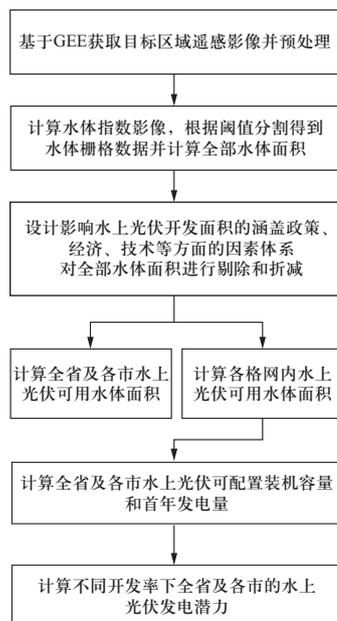


图1 研究思路

Fig. 1 Research route

2 遥感影像水体信息提取方法

2.1 水体信息提取平台

GEE平台内置覆盖全球的开源卫星遥感影像, 并

提供云端计算能力, 相较传统遥感数据处理方法, 计算效率显著提高, 极大降低大范围区域遥感数据分析所需时间。本研究借助GEE平台快速获取2020年覆盖江苏省全域哨兵2号 (Sentinel-2) 遥感影像并进行预处理, 进而计算MNDWI, 大大提升计算效率。

2.2 哨兵2号卫星数据

哨兵2号卫星是高分辨率多光谱成像卫星, 分为2A和2B两颗卫星, 一颗卫星重访周期为10 d, 两颗互补将卫星重访周期缩短为5 d。哨兵2号携带一枚多光谱仪器 (multispectral imager, MSI), 可覆盖13个光谱波段, 地面分辨率分别有10 m、20 m和60 m, 其主要波段如表1所示。

表1 哨兵2号卫星数据主要波段

Table 1 Main bands of Sentinel-2

波段	描述	空间分辨率	波长
B2	Blue	10 m	496.6 nm(S2A)/ 492.1 nm(S2B)
B3	Green	10 m	560 nm(S2A)/ 559 nm(S2B)
B4	Red	10 m	664.5 nm(S2A)/ 665 nm(S2B)
B8	NIR	10 m	835.1 nm(S2A)/ 833 nm(S2B)
B11	SWIR 1	20 m	1 613.7 nm(S2A)/ 1 610.4 nm(S2B)
B12	SWIR 2	20 m	2 202.4 nm(S2A)/ 2 185.7 nm(S2B)

2.3 水体指数法

NDWI法利用波段差异比值提取水体信息。水体在近红外波段具有强吸收性, 陆地与植被在近红外波段反射率明显增强, 波谱选择在绿光和近红外通道范围, 可突出水体与其他地物差异^[17]。MNDWI法使用短波红外波段 (SWIR) 替换NDWI中近红外波段^[18], 使计算出的水体与建筑物指数反差明显增强, 大大降低二者混淆程度, 有利于城镇中水体信息的准确提取^[19]。本文选用MNDWI法提取水体, 计算公式为

$$I_{\text{MNDWI}} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR}}} \quad (1)$$

式中: ρ_{Green} 、 ρ_{SWIR} 分别为哨兵2号影像各个像素在B3、B12波段的灰度值。

2.4 大津阈值法

通过水体指数影像提取水体信息, 由于地表复

杂性,以及同物异谱、同谱异物等现象,会导致误提取或部分细小水体被遗漏。因此,引入大津法(OTSU)——一种自适应阈值确定方法。将构成影像的所有像素分为背景像素和目标像素两类,根据概率统计原理,方差作为灰度分布均匀性的一种度量,方差愈大,构成影像两部分的差别愈大,若使分割两组类间方差最大,则影像两组数据错分误差最小^[17]。大津法目的是计算出一连通区域的阈值,对该区域进行二值化,具体表述如下:设影像像素灰度范围为 $[0,K]$,对应灰度级 i 的像素个数为 n_i ,其出现概率为

$$P_i = \frac{n_i}{N}, i = 0, 1, 2, \dots, K, \sum_{i=0}^K P_i = 1 \quad (2)$$

将影像中像素按照灰度阈值 t 分成两类 A 和 B , A 由灰度值 $[0,t]$ 的像素组成, B 由灰度值 $[t+1,K]$ 的像素组成,则像素属于 A 和 B 的概率分别为

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^t P_i, \omega_1 = \sum_{i=t+1}^K P_i = 1 - \omega_0 \quad (3)$$

A 、 B 的像素灰度均值分别为

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^t \frac{iP_i}{\omega_0}, \mu_1 = \sum_{i=t+1}^K \frac{iP_i}{\omega_1} \quad (4)$$

整个影像灰度均值为

$$\mu = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 \quad (5)$$

定义类间方差为

$$\sigma^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 \quad (6)$$

令 t 在 $[0,K]$ 范围内,以步长为1递增,当 σ^2 最大时对应的 t 即为最佳阈值。

2.5 可安装光伏水体面积影响因素及面积折减

在提取出全部水体后,按照国家水利部现行政策^[11]需进一步剔除航道、自然保护区、河道、湖泊、水库、生态功能保护区。同时还需要考虑建设条件、经济效益等因素,对水体面积进行折减,从而得到可安装光伏水体面积。综合考虑多种因素影响,本文建立了如表2所示的影响因素体系,包括政策、经济、技术三个方面,并针对不同因素提出了剔除或折减算法。

自然保护区参考中国自然保护区标本资源共享平台的自然保护区边界数据^[20];航道参考“地之图”网站《我国内河航线和主要港口分布图》^[21];河道和湖泊参考国家冰川冻土沙漠科学数据中心的全国1:25万三级水系流域数据集^[22];水库识别参考江苏省水利厅实时水情平台^[23];生态功能保护区

表2 水上光伏可用水体面积影响因素体系

Table 2 Reduction system of available water area for photovoltaics on water

因素分类	因素序号	影响因素	折减方法或系数
政策要求	1	自然保护区和航道	遥感识别剔除
	2	湖泊、河道、水库、生态功能保护区	遥感识别剔除
	3	水田	遥感识别剔除
经济要求	4	连片面积小于50 m ²	遥感识别剔除
技术要求	5	水体其他功能区	0.8

参考中国科学院资源环境科学与数据中心的生态功能保护区数据^[24];水田参考国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站的2020年全球30 m分辨率地表覆盖数据^[25]。水体最小连片面积参考文献^[26]的研究,从经济角度考虑,地面光伏项目需至少安装10块光伏组件、至少占地25 m²方可获得利润,考虑到水上光伏安装成本提高,本文选取50 m²为阈值。供技术安装使用的水体其他功能区折减系数由实地调研获得,现有渔光项目光伏板覆盖水面垂直投影面积比例在70%~90%之间,本文采用平均值80%。

2.6 水体提取精度验证及方法对比

本文选择基于Python语言计算的混淆矩阵评估分类结果。二分类混淆矩阵包含TP (True Positive)、FP (False Positive)、TN (True Negative)、FN (False Negative)。通过构造的混淆矩阵计算3种评价指标:精确度 (precision)、查全度 (recall)、F1-score,精确度表示被提取出来的水体中真正水体比例,查全度表示所有真正水体中被提取出来的水体比例。计算公式为

$$P_{\text{precision}} = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (7)$$

$$R_{\text{recall}} = \frac{T_p}{T_p + F_n} \quad (8)$$

$$F_1 = \frac{2 \times P_{\text{precision}} \times R_{\text{recall}}}{P_{\text{precision}} + R_{\text{recall}}} \quad (9)$$

为充分对比各方法间优缺点,本文选择SVM分类模型和U-Net语义分割网络2种方法与本文所提方法进行水体信息提取对比实验。其中,SVM方法具有适应性强、全局优化和泛化性能优良等优点,已广泛应用于遥感影像分类与各种地物信息提取研究^[27];U-Net

语义分割网络可以提取出原图上下文信息, 对小目标分割具有更佳效果^[28]。

3 水上光伏发电潜力分析

3.1 水上光伏设备安装方式

常用的水上光伏有桩基式与漂浮式2种安装方式。通常在水深小于3 m 鱼塘水面或滩涂湿地采用桩基式结构, 通过水上打桩机将管桩打入水底, 在桩端头安装光伏支架系统, 形成“上可发电、下可养鱼”的一体化发展模式^[29]。采用桩基式结构需考虑水位变化情况与水底地质条件是否可以实现桩基固定。在水深超过3 m 与水位变化较大或不确定水域选择漂浮式结构。漂浮式结构有2种类型, 一种将光伏组件用螺栓固定在漂浮于水面的浮体上; 另一种将光伏组件安装在钢或铝合金材料支架上, 支架固定于浮体, 浮体漂浮于水面^[30]。表3描述了不同安装方式的各自特点。

表3 水上光伏不同安装方式特点

Table 3 Characteristics of different installation methods of PV on water

安装方式	桩基式	支架漂浮式	一体漂浮式
安装适用性	需考虑水体地质条件与水位变化情况	无需考虑水位变化	无需考虑水位变化, 抗风能力强
安装工程	水体打桩, 基础工程量大, 施工方式简单	岸上进行浮体模块组装, 通过吊装或人工推动整体入水	岸上进行浮体模块组装, 通过吊装或人工推动整体入水
成本	混凝土桩成本较低, 随水深增加	支架加标准浮体, 成本较高	无需合金支架, 使用光伏专用浮体, 成本较低
发电量	倾角可调节, 发电量较高	倾角可调节, 发电量较高	倾角固定, 发电量稍低于其他两种
运维方式	船只运维	浮体上搭建人工通道	浮体上搭建人工通道

3.2 水上光伏发电潜力计算方法

3.2.1 太阳辐射量计算方法

本文选取Himawari气象卫星提供的时间分辨率为60 min的典型气象年太阳辐射数据集^[31], 包括2 km分辨率全球水平、直接法向和漫射水平辐照度气象数据, 覆盖中国境内全部区域, 可以折算得到不同安装倾角下光伏电池板上太阳辐照度。太阳入射角为太阳入射线与倾斜面法线夹角, 记为 θ_T , 如图2所示。

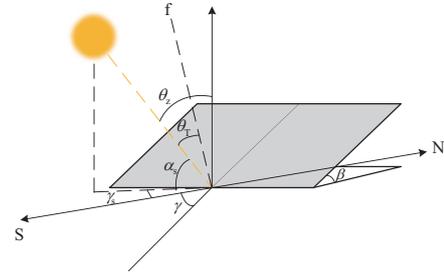


图2 太阳入射角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar incidence angle

太阳入射角可由式(10)计算得到:

$$\theta_T = \cos^{-1}(\cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)) \quad (10)$$

式中: β 为倾斜面倾角; θ_z 为太阳天顶角; γ_s 为太阳方位角; γ 为倾斜面方位角。

天空各向同性模型中, 倾斜面上太阳总辐照量由太阳直接辐照量、散射辐照量和地面反射辐照量3部分组成^[32]。如图3所示, 根据太阳光入射到AB面和AD面的辐射量相等原则, 确定倾斜面上太阳直接辐照量和入射角关系为

$$I_b = I_n \cos \theta_T \quad (11)$$

式中: I_n 为太阳直射辐射量; I_b 为倾斜面上太阳辐照量; θ_T 是太阳入射角。

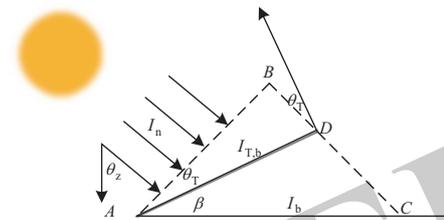


图3 倾斜面太阳辐射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of solar radiation on inclined plane

倾斜面上太阳散射辐照量可由式(12)计算得到:

$$I_{T,d} = \frac{1 + \cos \beta}{2} I_d \quad (12)$$

式中: I_d 为水平面散射辐照量。

地面反射辐照量与地面反射率成正比, 反射率越大, 反射辐照量越大, 由式(13)计算得到:

$$I_{T,0} = I_{GHI} \rho \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (13)$$

式中: ρ 为地面反射率; I_{GHI} 为水平面上总辐照量。综上, 倾斜面上太阳总辐射量可表示为

$$I = I_b + I_{T,d} + I_{T,0} \quad (14)$$

3.2.2 光伏电池工作温度计算方法

温度是影响光伏组件工作状态、进而影响发电量的重要因素。光伏组件正常工作时，电池片标准工作温度是25℃，一般工作温度大于25℃。如表4所示，电池片温度每升高1℃，N型单晶组件输出功率降低基准值0.38%，P型组件输出功率降低基准值0.42%。夏季水体比地面吸收更多太阳辐射，水面蒸发吸收大量热能起到冷却作用。夏季水体温度比地面低5℃，发电效率提高约2%。

表4 光伏电池峰值功率温度系数

Table 4 Peak power temperature coefficient of PV cell

光伏电池材料	N型单晶	P型单晶	P型多晶
峰值功率温度系数	-0.38%/℃	-0.42%/℃	-0.42%/℃

与空气温度相比，预测和获取水温非常困难，水温受到气温、太阳辐射、相对湿度、风速、气压和上游水特性等因素影响^[33]。其中，最重要的影响因素是气温和相对湿度，与水温存在强耦合关系。可利用气温和相对湿度近似估计水温^[34]：

$$T_{\text{water}} = 4.717e^{0.041T_{\text{air}}} \left(\frac{(1+r^2)^{0.781}}{(1+0.325\omega^2)^{0.0325}} \right) \quad (15)$$

式中： T_{water} 为水温； T_{air} 为气温； e 为自然常数； r 为相对湿度； ω 为水面风速，m/s。

3.2.3 系统综合效率系数估计

通过太阳辐射量和光照强度得到光伏电池板发电量，实际应用中存在污渍遮挡损失、最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)偏离损失、逆变器效率损失、线损等系统损耗，光伏系统发电效率难以达到100%^[35]。各影响因子效率损耗典型值如表5所示^[36]。

表5 光伏系统影响因子效率损耗典型值

Table 5 Typical value of photovoltaic system influencing factor efficiency loss

影响因素	影响因子	损耗值/%	效率值/%
光伏阵列	组件失配	4.0	89
	组件表面尘埃与积雪	3.0	
	弱光等不可利用太阳辐射	1.5	
	汇流箱防反二极管及线缆接头	1.5	
直流线路	阴影遮挡	1.0	98
	直流电缆	2.0	
逆变器	转换效率	2.0	97
	MPPT精度	1.0	

续表

影响因素	影响因子	损耗值/%	效率值/%
交流线路效率	逆变器至低压侧电缆	0.5	99.2
	高压侧至开关柜电缆	0.3	
升压并网系统效率	升压变压器	3.0	96
	电网检修率及设备故障	1.0	

考虑到水面灰尘遮挡较少，取组件表面灰尘遮挡损耗为2.0%。综上，计算得到系统综合效率估计值为 $\eta = 0.90 \times 0.98 \times 0.97 \times 0.992 \times 0.96 = 0.815$ 。

3.2.4 装机容量及发电量计算方法

水上光伏基座平行于水面。桩基式结构和漂浮式结构以年太阳辐射量最大为目标选取合适倾角。光伏电池直接固定在浮体上的漂浮式结构倾角一般不可调节。电池板阴影长度如式(16)计算^[37]：

$$d_{\text{shadow}} = H \frac{\cos \omega \tan \varphi - \tan \delta}{\tan \delta \tan \varphi + \cos \omega} \quad (16)$$

式中： ω 为时角； φ 为纬度； δ 为赤纬角。

如图4所示，为避免光伏电池板相互遮挡，可根据以下原则确定光伏电池板间最小距离：冬至日上午9:00至下午3:00之间，后排光伏板不被遮挡^[38]。因此，可用冬至日赤纬角 $\delta = -23.45^\circ$ ，上午9:00和下午3:00时角 $\omega = 45^\circ$ 。此时阴影长度为

$$d_{\text{shadow}} = H \frac{0.707 \tan \varphi + 0.4338}{0.707 - 0.4338 \tan \varphi} \quad (17)$$

令 $d = Hs$ ，则 s 可表示为

$$s = \frac{0.707 \tan \varphi + 0.4338}{0.707 - 0.4338 \tan \varphi} \quad (18)$$

式中： s 为阴影系数，表示时角为 45° 时最大阴影长度与光伏板高度的比值，仅与当地纬度 φ 有关。

定义填充因子为安装光伏板面积与提取得到水体可用面积比值。填充因子由式(19)计算得到：

$$c_{\text{PV}} = L/D = \frac{1}{\cos \beta + s \sin \beta} \quad (19)$$

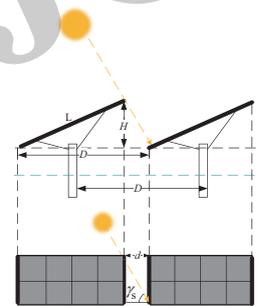


图4 光伏板安装面积示意图

Fig. 4 Schematic diagram of installation area of PV panel

水上光伏组件装机容量计算如下:

$$C_{\text{water}} = S_{\text{water}} \cdot c_{\text{PV}} \cdot P_{\text{STC}} / S_{\text{panel}} \quad (20)$$

式中: C_{water} 为水体光伏装机容量; S_{water} 为水体可用面积; P_{STC} 和 S_{panel} 分别为光伏板额定输出功率和面积。相应发电量由式 (21) 计算:

$$E_{\text{water}} = \eta \cdot C_{\text{water}} \cdot (I / I_{\text{STC}}) \cdot [1 - \tau \cdot (T_{\text{work}} - T_{\text{STC}})] \cdot \Delta t \quad (21)$$

式中: E_{water} 为水上光伏系统的发电量; I_{STC} 为光伏板标准工况下的太阳辐射量; T_{work} 为工作温度; T_{STC} 为光伏板标准工况下的温度; τ 为光伏板发电效率温度系数。

4 研究结果

4.1 可安装水上光伏水体面积分析

4.1.1 可安装水上光伏水体面积计算

应用本文方法, 计算得到江苏省全部水体面积约为 12 331.75 km²。进一步考虑 2.5 节所提出的各项影响因素得到江苏省光伏可安装面积为 1 514.70 km²。图 5 以苏州市阳澄湖为例展示了剔除前后水体提取结果对比。依次考虑各类影响因素后, 江苏省及各市的可安装光伏水体面积如表 6 所示。

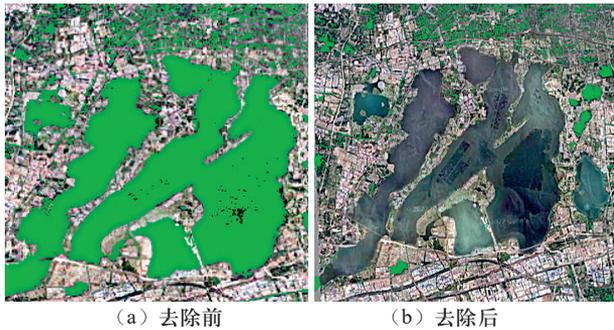


图 5 去除禁止安装光伏的区域前后水体提取结果对比
Fig. 5 Comparison of water extraction results before and after removing the area where PV installation is prohibited

表 6 江苏省及各市全部及可安装光伏的水体面积
Table 6 Area of water bodies where PV can be installed in each city of Jiangsu Province

区域	全部水体面积/km ²	剔除政策因素后面积/km ²					剔除经济因素后面积/km ²	剔除技术因素后面积/km ²
		因素1剔除后	因素2剔除后	因素3剔除后	因素4剔除后	因素5剔除后		
南京	707.88	496.17	313.87	95.63	95.61	76.49		
无锡	953.40	900.04	815.79	117.16	117.14	93.71		
徐州	314.19	296.73	143.10	88.40	88.40	70.72		

续表

区域	全部水体面积/km ²	剔除政策因素后面积/km ²					剔除经济因素后面积/km ²	剔除技术因素后面积/km ²
		因素1剔除后	因素2剔除后	因素3剔除后	因素4剔除后	因素5剔除后		
常州	524.36	512.35	201.27	117.29	117.27	93.82		
苏州	2 770.30	2 362.44	373.24	310.14	310.12	248.10		
南通	596.17	198.74	146.80	110.15	110.15	88.12		
连云港	568.64	567.98	347.91	70.59	70.58	56.46		
淮安	1 629.38	801.22	214.98	133.22	133.21	106.57		
盐城	1 195.44	780.84	576.14	354.61	354.59	283.67		
扬州	968.58	867.99	306.68	223.02	222.99	178.40		
镇江	297.28	102.59	74.61	31.00	31.00	24.80		
泰州	581.56	437.93	332.19	227.36	227.32	181.86		
宿迁	1 224.57	485.25	49.76	15.00	15.00	12.00		
全省	12 331.75	8 810.28	3 896.35	1 893.58	1 893.38	1 514.70		

4.1.2 精度验证

本文选取江苏省 2 个区域来验证水体提取精度, 以目视解译结果作为模型精度评定标准, 区域 1 共勾画水体样本 714 个, 区域 2 共勾画 92 个, 示例如图 6 所示。

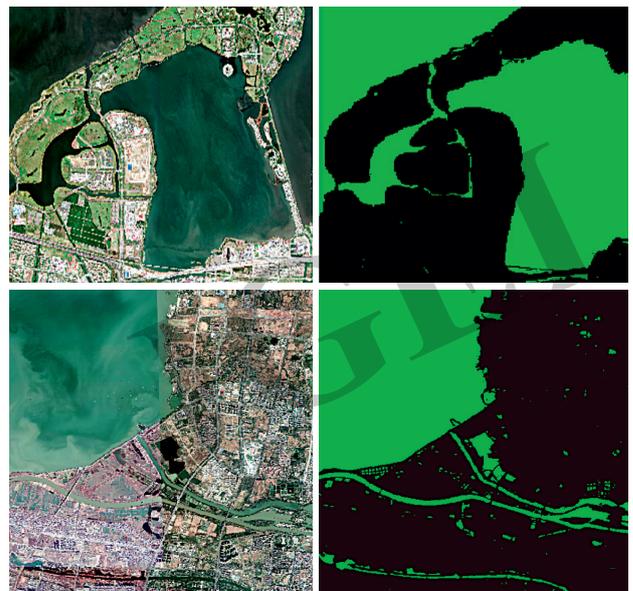


图 6 阈值法提取水体
Fig. 6 Water extracted by the threshold method

评价结果见表 7。主要误差来自于细小水体的漏提和建筑物阴影等误提。

表7 测试区域水体提取精度

Table 7 Test area water extraction accuracy

区域	中心点坐标	面积/km ²	精准度	查全度	F_1
区域1	(118.3°, 34.1°)	551	0.97	0.93	0.95
区域2	(120.8°, 31.4°)	27	0.99	0.96	0.98

4.1.3 方法对比

关于SVM法, 本文选择高斯核函数进行求解, C 设置为1, γ 设置为0.3。在区域1中进行训练, 训练后的模型在区域2中进行测试。

关于U-Net法, 本文将区域1哨兵2号影像及其对应标签裁剪成大小为384像素 \times 384像素的图像, 在裁剪过程中对图像进行随机数据增强, 按8:2随机分成27个训练样本和6个验证样本。训练后的模型在区域2中进行测试。三种方法提取精度对比如表8所示。

表8 对照试验结果

Table 8 Water extraction accuracy of three methods

方法	精准度	查全度	F_1
阈值法	0.99	0.96	0.98
SVM	0.98	0.86	0.92
U-Net	0.99	0.90	0.94

上述结果显示, 本文方法精度优于分类器法和深度学习方法, 且阈值法属于无监督方法, 相比深度学习需要绘制大量样本和花费较长训练时间, 人工干预较少, 更适用于大范围提取水体信息。考虑实际场景, 深度学习方法还需考虑遥感影像整理、预处理、拼接、去云等操作, 不可避免为实际应用带来巨大时间成本。运用阈值法在GEE云平台上进行水体信息提取更加方便, 具有更好的适用性。

4.2 水上光伏发电潜力分析

以南京市为例, 对水上光伏发电潜力进行分析。南京地处长江中下游, 雨量充沛, 阴雨天气多。当地日落时间从1月到6月逐渐延后, 6月份夏至节气后, 日落时间逐渐提前。夏季每天的日照时间约为14 h, 冬季约为12 h, 春秋季节约为13 h。7月、8月正午时分日照强度最高^[39]。

将南京市水体区域分成长、宽为0.04经纬度格网, 提取各格网内可部署水上光伏水体面积, 计算各格网发电潜力。水面反射率 ρ_{water} 取0.69。

为了取得最大辐射量, 光伏电池板水平朝向选取正南方向。以每个格网内年太阳辐射总量取最大值为

目标遍历0~90°光伏板倾角, 得到南京地区水上光伏最佳倾角在33°~38°之间, 平均值为35.3°。南京市可部署水上光伏水体面积为76.49 km², 选取最佳倾角后可安装光伏板面积为39.64 km², 可部署装机容量为814.22万kW。计算得到选取最佳倾角后年发电潜力为102.12亿kWh。首年逐月发电量计算结果如图7所示。总体上南京市春夏季发电量较多而秋冬季发电量较少。月日均发电量最大值出现在4月, 最小值出现在1月。6、7月份夏季潮湿多雨, 太阳辐射量减少, 因此, 6月份发电量出现低谷。

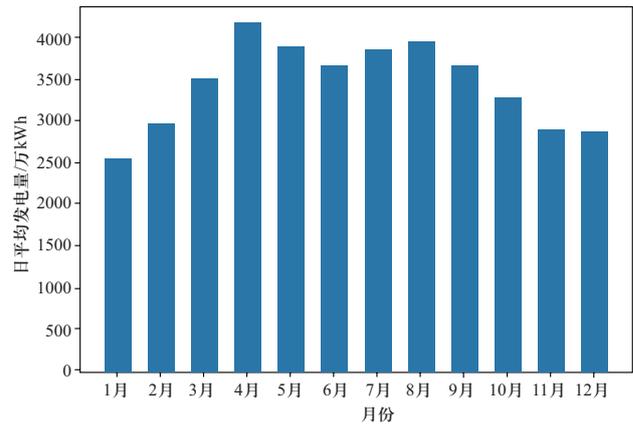


图7 南京地区水上光伏首年逐月日平均发电量

Fig. 7 Monthly average daily power generation of PV on water in Nanjing in the first year

表9记录了太阳能资源及潜在水体充分利用情况下, 江苏省各市当前技术水平下水上光伏潜力上限值。

表9 江苏省各市水上光伏发电潜力结果

Table 9 Evaluation results of PV on water power generation potential in each city of Jiangsu Province

区域	陆域面积/km ²	可安装光伏水体面积/km ²	装机容量/万kW	首年发电量/亿kWh	全年发电利用小时/h
南京	6 587.02	76.49	814.22	102.12	1254
无锡	4 627.47	93.71	949.38	115.33	1215
徐州	11 258	70.72	690.76	94.75	1372
常州	4385	93.82	997.93	124.85	1251
苏州	8 657.32	248.10	2 757.74	328.55	1191
南通	8001	88.12	916.38	117.45	1282
连云港	7615	56.46	530.66	72.92	1374
淮安	10 030	106.57	1 060.76	136.93	1291
盐城	16 931	283.67	2 799.78	374.05	1336
扬州	6 591.21	178.40	1 846.98	236.97	1283
镇江	3840	24.80	255.02	32.66	1281

续表

区域	陆域面积 /km ²	可安装光伏水体面积 /km ²	装机容量 /万kW	首年发电量 /亿kWh	全年发电利用小时/h
泰州	5 787.26	181.86	1 828.36	240.67	1316
宿迁	8555	12.00	118.38	15.78	1333
全省	102 865.3	1 514.70	15 566.36	1 993.03	1264

如图8所示, 江苏省各市中, 水上光伏可配置装机容量从高到低依次为盐城、苏州、扬州、泰州、淮安、常州、无锡、南通、南京、徐州、连云港、镇江、宿迁; 水上光伏首年发电量从高到低依次为盐城、苏州、泰州、扬州、淮安、常州、南通、无锡、南京、徐州、连云港、镇江、宿迁。

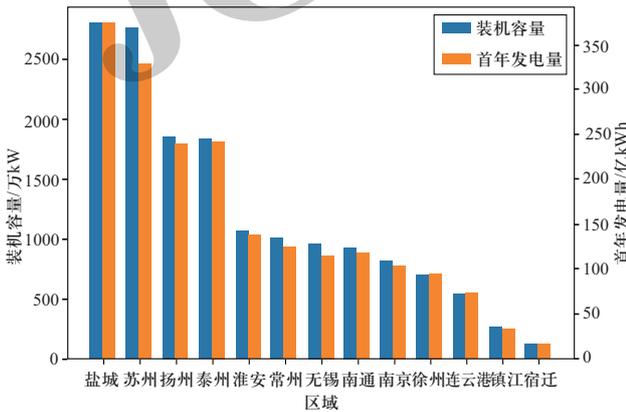


图8 江苏省各市可配置水上光伏装机容量和首年发电量
Fig. 8 PV on water installed capacity and first year power generation in each city of Jiangsu Province

水上光伏可安装面积与当地太阳能资源情况共同决定了一个地区水上光伏的发电潜力。综合江苏省各市水上光伏可安装面积与可利用太阳能资源数据, 可以得到各市水上光伏发电潜力受这两个因素影响的关系, 如图9所示, 其中气泡大小反映了各市首年发电量的大小。从图9可以看出, 盐城水上光伏发电潜力最大, 主要是由于其可安装水体面积最大, 且太阳能资源情况较好。其余城市中, 位于北部的徐州、连云港、宿迁三市太阳能资源情况较好, 但受限于可安装光伏水面面积, 其实际发电潜力反而不如位于南部的苏州和无锡。镇江同时受限于两个影响因素, 导致最终评估的发电潜力较低。

据江苏统计年鉴2021^[40], 2020年江苏省累计全社会用电量6 373.71亿kWh, 各市全社会用电量如表10所示, 各市平均全社会用电量约为490亿kWh。通过

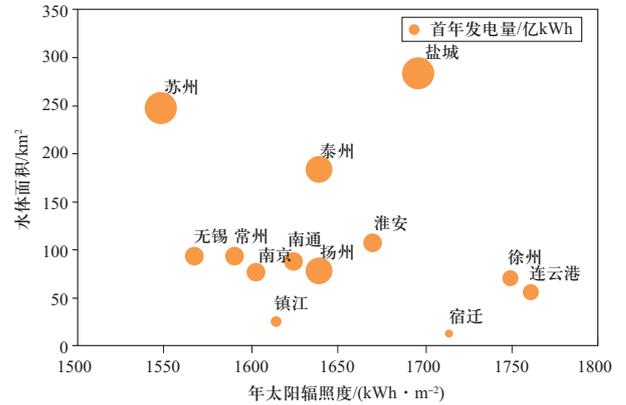


图9 水体面积-年太阳辐射度-首年发电量关系图

Fig. 9 Relationship of water area - annual solar irradiance and first year power generation

计算“水上光伏首年发电量/全社会用电量”指标, 可以发现江苏省水上光伏潜力较大, 首年发电量达到2020年江苏省全社会用电量的31.27%, 其中盐城的指标超过1。

表10 水上光伏首年发电量与全社会用电量的比值

Table 10 Ratio of PV on water power generation in the first year to power consumption of the whole society

区域	全社会用电量 /亿kWh	首年发电量与全社会用电量的比值/%	区域	全社会用电量 /亿kWh	首年发电量与全社会用电量的比值/%
全省	6 373.71	31.27	扬州	264.66	89.54
南京	632.94	16.13	泰州	306.88	78.42
无锡	759.53	15.19	徐州	364.96	25.96
常州	522.62	23.89	连云港	194.10	37.57
苏州	1 523.34	21.57	淮安	193.81	70.65
镇江	267.05	12.23	盐城	358.22	104.42
南通	477.29	24.61	宿迁	222.51	7.09

5 讨论

本文所展示水上光伏发电潜力评估方法可以在兼顾精确度和评估效率的基础上实现省域、市域等大范围水上光伏发电潜力的资源评估。进一步地, 本研究提取水体采用了广泛使用的指数法, 未来随着水体信息算法的进步, 大面积水体提取精度还有进一步提升潜力。同时, 本文选择了来自气象卫星的太阳能资源数据, 适用于大范围评估。对于某些具体的区域而言, 当地地面气象站数据精度可以达到更高。但是地面气象站点分布离散, 数据形式也较为离散, 因此若

兼顾局部太阳能资源数据精度和大范围评估目标,也将有显著的提升空间。

本文提出的方法在技术上支撑水上光伏发电项目的大面积评估和科学论证,同时考虑了宏观层面政策和经济性的多重影响。实际的光伏项目开发还受到项目具体因素的影响,如开发意愿、市场环境等,具体项目的光伏可安装面积和开发程度可能发生进一步折减。另外,目前技术条件下,水上光伏大规模应用的制约因素仍较多,如浮体架台对抗腐蚀性能、低密度、抗冻胀、抗风浪、寿命、承载能力等要求较高;选址宜在面积较广、径流稳定、风速低、光照条件好、水位变化较小、开发条件较好、生态非敏感区等水域;要求光伏组件对水质、水中鱼类、植物等无不利影响;施工过程考虑因素多,水上作业难度大,工期较长等。表11给出了在1%、5%、10%和50%开发率下,江苏全省及各市水上光伏可安装面积、装机容量和首年发电量变化情况。

表 11 江苏全省及各市水上光伏配置随开发率变化情况
Table 11 PV on water development status in Jiangsu Province change along with the utilization rate

区域	可安装 水体面 积/km ²	装机 容量 /万kW	首年 发电量 /亿kWh	可安装 水体面 积/km ²	装机 容量 /万kW	首年 发电量 /亿kWh
全省	15.15	155.66	19.93	75.74	778.32	99.65
南京	0.76	8.14	1.02	3.82	40.71	5.11
无锡	0.94	9.49	1.15	4.69	47.47	5.77
常州	0.94	9.98	1.25	4.69	49.90	6.24
苏州	2.48	27.58	3.29	12.40	137.89	16.43
镇江	0.25	2.55	0.33	1.24	12.75	1.63
南通	0.88	9.16	1.17	4.41	45.82	5.87
扬州	1.78	18.47	2.37	8.92	92.35	11.85
泰州	1.82	18.28	2.41	9.09	91.42	12.03
徐州	0.71	6.91	0.95	3.54	34.54	4.74
连云港	0.56	5.31	0.73	2.82	26.53	3.65
淮安	1.07	10.61	1.37	5.33	53.04	6.85
盐城	2.84	28.00	3.74	14.18	139.99	18.70
宿迁	0.12	1.18	0.16	0.60	5.92	0.79
	10%开发率			50%开发率		
全省	151.47	1 556.64	199.30	757.35	7 783.18	996.52
南京	7.65	81.42	10.21	38.25	407.11	51.06
无锡	9.37	94.94	11.53	46.86	474.69	57.67
常州	9.38	99.79	12.48	46.91	498.97	62.42

续表

区域	可安装 水体面 积/km ²	装机 容量 /万kW	首年 发电量 /亿kWh	可安装 水体面 积/km ²	装机 容量 /万kW	首年 发电量 /亿kWh
苏州	24.81	275.77	32.86	124.05	1 378.87	164.28
镇江	2.48	25.50	3.27	12.40	127.51	16.33
南通	8.81	91.64	11.75	44.06	458.19	58.73
扬州	17.84	184.70	23.70	89.20	923.49	118.49
泰州	18.19	182.84	24.07	90.93	914.18	120.33
徐州	7.07	69.08	9.47	35.36	345.38	47.37
连云港	5.65	53.07	7.29	28.23	265.33	36.46
淮安	10.66	106.08	13.69	53.28	530.38	68.47
盐城	28.37	279.98	37.41	141.83	1 399.89	187.03
宿迁	1.20	11.84	1.58	6.00	59.19	7.89

6 结论

本研究基于哨兵2号遥感卫星影像提取出江苏省全部水体信息,并依托国家现行水上光伏管理政策要求,综合考虑政策、经济、技术等方面因素影响,对水体面积进一步折减,得到江苏全省水上光伏可安装水体面积为1 514.70 km²,进而计算全省总可配置光伏装机容量为15 566.36万kW,利用对应地区典型气象年太阳辐射数据,计算得到全省水上光伏首年总发电潜力为1 993.03亿kWh,占2020年全省全社会用电量的31.27%。分析得到了江苏省各市可安装水上光伏水体面积、可配置光伏装机容量和发电潜力。其中,盐城市水上光伏开发潜力最大,可安装水上光伏水体面积、可配置光伏装机容量和首年发电潜力分别达到283.67 km²、2 799.78万kW和374.05亿kWh。考虑到作为一种新型开发方式,水上光伏项目在政策、经济、技术等方面的影响因素较多,本文也进一步给出了在1%、5%、10%和50%开发率下江苏全省及各市的水上光伏可安装面积、装机容量和首年发电量。

本文为省域光伏发电潜力的快速评估和分析提供了有效方法,评估精度优于分类器法和深度学习方法。评估方法和结果可为有关部门掌握分布式水上光伏发电开发资源潜力、制定发展规划、科学精准评估开发项目提供参考。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展

- 统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2022.
- [2] 前瞻产业研究院. 2022—2027年中国分布式能源行业市场前瞻与投资战略规划分析报告[R]. 2022.
- [3] Energy Sector Management Assistance Program. Where sun meets water: floating solar market report[R/OL]. (2019-06-13) [2022-05]. https://www.esmap.org/where_sun_meets_water_floating_solar_market_report.
- [4] 陈东坡. 我国水上光伏电站的新机遇、新发展和新挑战[J]. 电子产品世界, 2017, 24(5): 3-5.
CHEN Dongpo. New opportunities, developments and challenges of Chinese photovoltaic power plants[J]. Electronic Engineering & Product World, 2017, 24(5): 3-5(in Chinese).
- [5] 钱华政, 蒋礼平, 梁勤朗, 等. “渔光一体”光伏组件遮光比例对池塘水质及草鱼生长性能的影响[J]. 渔业现代化, 2021, 48(6): 42-49.
QIAN Huazheng, JIANG Liping, LIANG Qinlang, et al. The effect of “Fishery-PV Integration” module shading rate on pond ecology and grass carp growth[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(6): 42-49(in Chinese).
- [6] 张木梓, 王艺澄. 全球水上光伏产业的发展现状及市场前景分析[J]. 太阳能, 2020(7): 19-24.
ZHANG Muzi, WANG Yicheng. Global floating PV industry development status and market prospect analysis[J]. Solar Energy, 2020(7): 19-24(in Chinese).
- [7] 宋鑫, 贝耀平, 袁丙青, 等. 水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 204-211.
SONG Xin, BEI Yaoping, YUAN Bingqing, et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 204-211(in Chinese).
- [8] 孙杰. 水上光伏电站应用技术与解决方案[J]. 节能与环保, 2017(2): 48-51.
- [9] 熊志康, 刘佳祺, 沈美琪, 等. 渔光一体项目的效益分析: 以TW新能源省级渔业精品园为例[J]. 热带农业工程, 2020, 44(3): 38-42.
XIONG Zhikang, LIU Jiaqi, SHEN Meiqi, et al. Benefit analysis of integrated project of fishing and lighting—taking TW new energy provincial fishery boutique park as an example[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2020, 44(3): 38-42(in Chinese).
- [10] 江富平. 光伏发电项目综合效益评价研究—以“渔光互补型”光伏电站为例[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
JIANG Fuping. The study of comprehensive benefit evaluation in photovoltaic power generation project—an example of “fishing complementary” photovoltaic power plant[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016(in Chinese).
- [11] 中华人民共和国水利部. 水利部关于加强河湖水域岸线空间管控的指导意见[Z/OL]. (2022-05-25) [2022-05-26]. http://www.mwr.gov.cn/zw/tzgg/tzgs/202205/t20220525_1575714.html.
- [12] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9-19.
SU Longfei, LI Zhenxuan, GAO Fei, et al. A review of remote sensing image water extraction[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021, 33(1): 9-19(in Chinese).
- [13] 徐涵秋. 水体遥感指数研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 613-625.
XU Hanqiu. Development of remote sensing water indices: a review[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 613-625(in Chinese).
- [14] 李彤. 基于Landsat 8 OLI数据与水体指数法的地表水体提取对比研究[J]. 河南科技, 2020, 39(25): 45-47.
LI Tong. Comparative study of surface water extraction based on Landsat 8 OLI data and water index method[J]. Henan Science and Technology, 2020, 39(25): 45-47(in Chinese).
- [15] 刘瑞杰. 基于多源遥感数据提取密云水库水体的方法效果探究[J]. 国土资源信息化, 2020(3): 50-57.
LIU Ruijie. Research on the effect of extracting the water body of Miyun Reservoir based on different methods of multi-source data[J]. Land and Resources Informatization, 2020(3): 50-57(in Chinese).
- [16] 乔丹玉, 郑进辉, 鲁晗, 等. 面向不同环境背景的Landsat影像水体提取方法适用性研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(4): 710-722.
QIAO Danyu, ZHENG Jinhui, LU Han, et al. Application of water extraction methods from Landsat imagery for different environmental background[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(4): 710-722.(in Chinese)
- [17] 袁欣智, 江洪, 陈芸芝, 等. 一种应用大津法的自适应阈值水体提取方法[J]. 遥感信息, 2016, 31(5): 36-42.
YUAN Xinzhi, JIANG Hong, CHEN Yunzhi, et al. Extraction of water body information using adaptive threshold value and OTSU algorithm[J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(5): 36-42(in Chinese).
- [18] XU H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [19] 王大钊, 王思梦, 黄昌. Sentinel-2和Landsat8影像的四种常用水体指数地表水体提取对比[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 157-165.
WANG Dazhao, WANG Simeng, HUANG Chang. Comparison of Sentinel-2 imagery with Landsat8 imagery for surface water extraction using four common water indexes[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 157-165(in Chinese).
- [20] 中国自然保护区标本资源共享平台. 2021年全国(国家级、省级、市县级)自然保护区边界矢量数据[DS/OL]. (2021) [2021-12-28]. <http://www.papc.cn/html/folder/946895-1.htm>.
- [21] 地之图. 全国内河高等航道和主要港口分布图[DS/OL]. (2015)[2021-12-28]. <http://map.ps123.net/traffic/html/19490.html>.
- [22] 沈永平. 全国1:25万三级水系流域数据集[DS/OL]. (2019-01-23) [2021-12-28]. <http://www.ncdc.ac.cn>.
SHEN Yongping. National 1:250000 three-level river basin data set[DS/OL]. (2019-01-23) [2021-12-28]. <http://www.ncdc.ac.cn>.

- [23] 江苏省水文水资源勘测局. 江苏省水利厅实时水情平台[Z/OL]. [2022-05-30]. <http://218.94.6.94:88/jsswxSSI/Web/Default.html?m=2>.
- [24] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 中国生态功能保护区[DS/OL]. [2022-05-30]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=137>.
- [25] 国家基础地理信息中心. 全球地表覆盖数据[DS/OL]. [2022-05-30]. <https://www.webmap.cn/commres.do?method=globeIndex>.
- [26] 徐文钦. 我国光伏电站投资策略研究[J]. 上海煤气, 2022(1): 35-38.
XU Wenqin. Research on investment strategy of photovoltaic power station in China[J]. Shanghai Gas, 2022(1): 35-38(in Chinese).
- [27] 乔凤娟, 郭红利, 李伟, 等. 基于SVM的深度学习分类研究综述[J]. 齐鲁工业大学学报, 2018, 32(5): 39-44.
QIAO Fengjuan, GUO Hongli, LI Wei, et al. Research on deep learning classification based on SVM: a review[J]. Journal of Qilu University of Technology, 2018, 32(5): 39-44(in Chinese).
- [28] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Springer, Cham, 2015: 234-241.
- [29] 田德宝, 杨群超, 徐颖, 等. 水上光伏发电系统雷电防护技术[J]. 气象科技, 2017, 45(5): 907-911.
TIAN Debao, YANG Qunchao, XU Ying, et al. Lightning protection technology for water photovoltaic power generation system[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(5): 907-911(in Chinese).
- [30] CHOI Y K. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact[J]. International Journal of Software Engineering and Its Applications, 2014, 8(1): 75-84.
- [31] National Renewable Energy Laboratory. The Himawari: PSM v3[DS/OL]. [2022-05-30]. <https://developer.nrel.gov/docs/solar/nsrdb/himawari-tmy-download/>.
- [32] 高赟, 赵娜, 贺文山, 等. 水上光伏电站设计要点和经济性分析[J]. 太阳能, 2017(6): 18-22.
- [33] OUYANG H, XUE X S, QIU Z X, et al. Estimation of river water temperature from air temperature: using least square method[C]//Advances in Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2018.
- [34] 李克锋, 郝红升, 庄春义, 等. 利用气象因子估算天然河道水温的新公式[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(1): 1-4.
LI Kefeng, HAO Hongsheng, ZHUANG Chunyi, et al. A new method for predicting water temperature of river by using meteorological factors[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(1): 1-4(in Chinese).
- [35] 中国质量认证中心. 并网光伏电站性能检测与质量评估技术规范: CNCA/CTS0016—2015[S]. 北京: 中国质量认证中心, 2014.
- [36] 牛高远, 王以笑, 龚晓伟, 等. 基于PVsyst的分布式并网光伏发电系统效率分析与优化研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 196-202.
NIU Gaoyuan, WANG Yixiao, GONG Xiaowei, et al. Study of efficiency analysis and optimization for distributed gridconnected photovoltaic power generation systems based on PVsyst[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(2): 196-202(in Chinese).
- [37] MA X S, YAO G H, YE L J, et al. Distance calculation between photovoltaic arrays fixed on sloping ground[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2015, 15(1): 107-116.
- [38] 杨金焕, 于化丛, 葛亮. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [39] 黄静, 陈志鹏, 李存霖, 等. 南京地区的太阳能辐射特性[J]. 电力与能源, 2013, 34(1): 82-84.
HUANG Jing, CHEN Zhipeng, LI Cunlin, et al. Characteristics of solar radiation in Nanjing[J]. Power & Energy, 2013, 34(1): 82-84(in Chinese).
- [40] 中国经济社会大数据研究平台. 江苏统计年鉴2021[EB/OL]. (2021)[2021-12-28]. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2021110156>.

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-06-08。



宋福龙

作者简介:

宋福龙(1979), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统规划、特高压电网规划、新能源并网关键技术等, E-mail: songfulong@geidco.org。

陈晨(1990), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力供需与电力系统经济性、新能源发电并网规划等。通信作者, E-mail: c-chen@geidco.org。

张雯悦(2000), 女, 博士研究生, 研究方向为遥感地理信息系统, E-mail: zhangwenyue22@mails.ucas.ac.cn。

彭玲(1965), 女, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感信息智能检测与情报分析决策支持, E-mail: pengling@aircas.ac.cn。

赵帅军(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: 2021234428@tju.edu.cn。

车廷博(1972), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子化电力系统、新能源、智能电网, E-mail: ybche@tju.edu.cn。

陈德跃(1998), 男, 研究生, 研究方向为遥感智能信息提取、自监督学习, E-mail: chendeyue20@mails.ucas.ac.cn。

(责任编辑 李锡)