

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.020

基于 SWAN 模型的海上光伏群桩对近岸波浪场的影响分析

涂彧涵^{1,2}, 张蔚^{1,2}, 黄睿^{1,2}, 王晓光^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 针对大规模海上光伏群桩对近岸波浪场的影响, 依托 SWAN 模型提出一种基于底摩擦系数等效的概化方法, 从而解决高密度桩基全网格模拟计算效率低的瓶颈; 运用该方法模拟了山东省青岛市棋子湾海上光伏站 5 万根桩基在不同工况下对波浪场的衰减效应。结果表明: 群桩对波浪传播具有显著的阻挡作用, 波高衰减由海向陆逐渐增大, 极端工况下近岸侧波高衰减率可达 30%。该方法能有效解决大规模群桩模拟的计算难题, 可为海上光伏项目的波浪场影响以及桩基设计与参数选择提供技术手段。

关键词: 海上光伏; 波浪场; 波高衰减; 底摩擦系数; SWAN 模型; 棋子湾海上光伏站

Impact analysis of offshore photovoltaic pile groups on nearshore wave fields based on SWAN model

Tu Yuhan^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Huang Rui^{1,2}, Wang Xiaoguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the impact of large-scale offshore photovoltaic pile groups on nearshore wave fields, a generalized model method adopted SWAN model based on equivalent bottom friction coefficient was proposed to solve the bottleneck of low computational efficiency in full-grid simulation of high-density pile foundations. Based on the method, the attenuation effect of 50 000 pile foundations on wave fields under different working conditions in the offshore photovoltaic area of Qizi Bay, Qingdao, Shandong Province was simulated. The results indicate that the pile group has a significant blocking effect on wave propagation; the wave height attenuation gradually increases from sea to land, and the wave height attenuation rate on the nearshore side can reach 30% under extreme conditions. This method can effectively solve the computational difficulties in simulating large-scale pile groups and provides technical means for the wave field impact, pile foundation design, and parameter selection of offshore photovoltaic projects.

Key words: offshore photovoltaic; wave field; wave height attenuation; bottom friction coefficient; SWAN model; Qizi Bay offshore photovoltaic station

可再生能源的快速发展, 对实现全球气候目标、保障能源安全及推动社会经济可持续发展具有不可替代的战略意义, 已成为应对气候危机、保障能源供给的重要途径^[1-2]。根据国际能源署的研究数据, 可再生能源发电量在全球总发电量的占比将从 2020 年的 29% 增至 2030 年的 60% 以上, 到 2050 年有望接近 90%, 其中风电与光伏发电量可达总发电量的 70%^[3]。在各类可再生能源中, 太阳能作为增速快、应用前景广阔的清洁能源, 发展潜力突出^[4], 而光伏设备是实现太阳能向电能高效转换的关键载体。在众多太阳能发电技术中, 海上光伏凭借其独特的优势, 已成为极具发展潜力的技术方向, 规模化、阵列式光伏系统呈现出强劲的发展态势^[5]。相较于陆上光伏, 海上光伏光照条件更优、可用空间更广, 降低了对土地资源的依赖, 进一步提升了工程的经济可行性^[6]。固定式海上光伏作为新兴的海上能源开发形式, 主要利用桩基础作为光伏组件的支撑结构^[7]。根据装机容量的差异, 海上光伏场址通常需布设数千乃至上万根桩基, 其桩基布设对区域流场、波浪场的影响, 是项目建设安全、工程投资及区域生态保护的重要影响因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42206165)

作者简介: 涂彧涵 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: 18720009167@163.com

通信作者: 张蔚 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事河口海岸水动力学、近海潮波运动及河口地貌演变研究。E-mail: w. zhang@hhu.edu.cn

当前,数值模拟技术已广泛应用于波浪与结构相互作用的分析中,其高效性与经济性为工程实践提供了重要支持^[8]。王鑫等^[9]通过构建三维冲刷数值模型,依托如东海上风电场风力机基础,揭示了风力机基础冲刷机理;薛玉娆等^[10]基于 FVCOM 三维水动力模型,将桩柱绕流阻力等效转化为水流阻力,提出一种桩群阻水效果概化方法,通过在水动力控制方程中引入桩群阻力项,探究不同桩群布置对水动力环境参数的影响,构建了关于群桩下方和后方流场演变规律的三维水动力改进模型;谢友鸽等^[11]通过改变底摩擦系数,以实现东沙岛海域模拟的有效波高与卫星实测数据的吻合,结果表明,调整底摩擦系数能够很好地反映波浪的演变特征。此外,相关学者围绕数值模拟与海上结构物进行分析研究^[12-17],但是以往近岸工程桩基布局相对稀疏,其对波浪的衰减影响有限。而海上光伏工程不同于常规海上结构物,受光伏板密集效应的影响,支撑光伏板的群桩数量可达万计^[18]。受算力条件的限制,在进行海岸动力影响的研究中,很难实现百万级网格的效率计算。因此本文以棋子湾海上光伏站为例,提出等效摩阻概念,通过区域化局部加密网格,使摩阻等效于群桩的影响,再赋值于整个近海场重新进行计算,以此等效桩基对流场与波浪场的影响。该方法在提升计算效率的同时,可合理还原群桩作用下波浪场的变化规律,为海上光伏工程波浪响应模拟及工程安全评估提供参考。

1 研究区概况

棋子湾海上光伏站(35°38'N,119°45'E)位于山东省青岛市黄岛区沐官岛附近的棋子湾海域,处于黄海海域潮间带,涨潮时场地被海水淹没,落潮后局部地段出露;自然地面高程在-6.0~0.45 m 之间,潮滩表层沉积物以砂为主,中值粒径为 0.1~0.49 mm,横河口外侧及河道尾闾细颗粒含量增大,海底表层沉积物砂含量小于 50%,粉砂和黏土含量相对增高。根据董家口港 2006 年 9 月至 2007 年 8 月逐时验潮实测数据资料,该海域平均潮差为 2.94 m,最大潮差可达 4.79 m。

光伏站距海岸边最近距离约 50 m,最远距离约 1 km。上游有横河连接入海口,目前拟分为两侧开发建设,分别位于横河入海口东、西侧。选择单排桩轻型固定支架方案作为光伏基础,光伏场采用标准化阵列布置,方阵长 29.98 m,宽 4.58 m,单个方阵上有 2(排)×26(列)光伏桩,桩直径 0.4 m,站内共计约 5 万根光伏桩。计算区域及光伏站位置如图 1 所示。

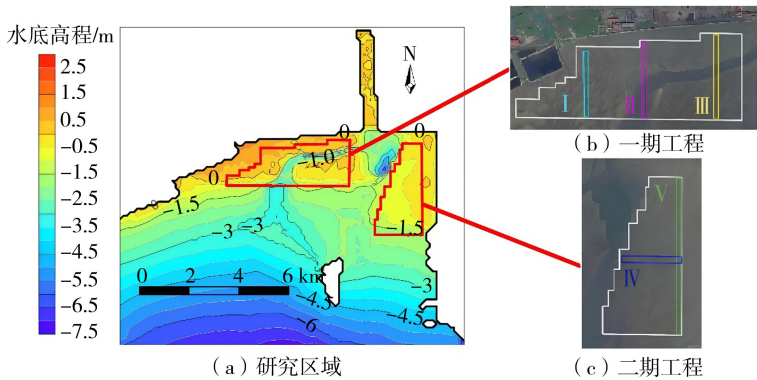


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 SWAN 模型

SWAN 模型是在第三代海浪模型 WAM 的基础上优化改进的模型,适用于近岸、湖泊、河口等浅水区域的波浪数值模拟。该模型综合考虑波浪浅化、折射、底摩擦、水深引起的波浪破碎、风能输入以及三波与四波非线性相互作用等物理过程,可合理模拟近岸波浪的生成与传播过程^[19-20]。SWAN 模型采用基于 Euler 近似的作用量谱平衡方程,因在流场中能谱密度并不守恒,但能谱密度与相对频率的比值守恒,即动谱密度具有守恒性。在笛卡尔坐标系下,动谱平衡密度表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial v_x N}{\partial x} + \frac{\partial v_y N}{\partial y} + \frac{\partial v_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\sigma N}{\partial \sigma} = \frac{S}{\sigma} \tag{1}$$

式中: N 为波作用量密度; $\nu_x, \nu_y, \nu_\theta, \nu_\sigma$ 分别为 N 在方向 x, y, θ, σ 上的传播速度; S 为以谱密度表示的源汇项,包含风能输入 S_{in} ,非线性波相互作用 S_{nl3}, S_{nl4} ,白帽耗散 $S_{ds,w}$,底摩擦耗散 $S_{ds,b}$,波浪破碎耗散 $S_{ds,br}$,进一步解释可参考 Yang 等^[21] 的研究。

2.2 网格及地形建立

计算地形资料来自现场实测和海图,采用高斯-克吕格投影将地形数据投影至 CGCS2000 坐标系,中央子午线设定为 120°。所有水深点高程基准统一调整为 1985 高程基准。模型计算域横向宽度为 16 km,纵向长度为 11 km,工程区距离波浪入射边界约 7.6 km。为充分考虑光伏电站下方沐官岛对工程区的影响,对其进行挖空处理,波浪以绕射和反射形式传播。

模型时间步长设为 3 s,时间步数 1000 步,模拟时长 50 min。计算域风生浪较小,故模型不考虑风场与冰盖的影响,重点考虑波浪的衍射、能量交换、波浪破碎、底摩擦影响、白帽耗散等过程;波能的交换采用四相波非线性相互作用机制,波能破碎耗散指数取 0.80,白帽耗散系数取 4.5。底摩擦耗散指数采用尼古拉兹粗糙度设定,根据水深将其设置为随空间变化的参数文件。水深最深处糙率为 0.06,近岸处取 0.18。不考虑桩基,模型共包含 78 858 个网格单元、40 043 个计算节点,计算网格见图 2。网格的尺寸介于 50~100 m。由于不考虑光伏桩的影响,模型使用的网格大小能够满足所需的求解精度要求。

2.3 边界条件与模型验证

将黄家塘湾与沐官岛设为陆地边界,该边界不含波浪信息,即没有波浪从该边界进入计算区域,而从该边界传播到模型外的波浪则被完全吸收。将近海洋边界设为波浪开边界,模型采用冷启动方式进行计算,风浪谱选用 JONSWAP 谱;通过有效波高、谱峰周期、平均波向及方向分布度等波浪参数设置边界条件,并将水位按设计标准(1 年、25 年、50 年、100 年一遇)设为恒定值,可促使模型快速收敛并达到稳定流场状态。

为了验证模型各参数的影响,选取山东电力工程咨询院有限公司 7 个测点在极端波浪条件下的实测波高值,与模型计算值进行比较,测点位置如图 3 所示,计算结果见表 1。从表 1 可以看出,7 个测点波高的模型计算值和实测值非常接近。近岸测点因波高的绝对值较小,加之受地形影响,细微变化也会引起波高相对值变化较大,从而造成误差的波动,这可能是造成个别测点误差略大的原因。在 SSE、S、SSW 3 个方向上误差相差不明显,SSE、SSW 向因波浪传播过程中受地形和沿岸建筑物影响较强,故误差略高,总体平均相对误差为 2.17%~4.33%。以上计算结果表明,模型对近岸波浪设计要素具备较高的计算精度,能够较好地复现研究区工程前波浪场分布特征,可满足后续数值模拟与机理分析的应用要求。

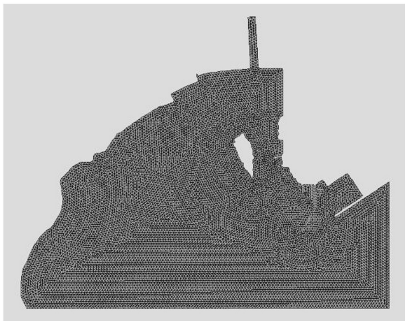


图 2 计算网格
Fig. 2 Computational grid

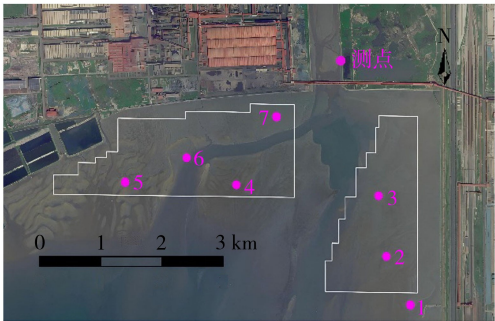


图 3 各测点具体位置
Fig. 3 Specific locations of measurement points

表 1 模型计算波高与实测波高对比

测点	模型计算波高/m			实测波高/m			误差/%		
	S 向	SSE 向	SSW 向	S 向	SSE 向	SSW 向	S 向	SSE 向	SSW 向
1	1.12	0.98	1.21	1.10	0.91	1.18	1.79	7.14	2.33
2	1.27	1.22	1.23	1.24	1.12	1.21	2.36	8.20	1.69
3	1.22	1.17	1.22	1.25	1.16	1.25	2.46	0.85	2.08
4	1.39	1.32	1.46	1.35	1.30	1.38	2.88	1.52	5.44
5	1.21	1.13	1.28	1.16	1.14	1.18	4.13	0.88	8.00
6	0.89	0.83	0.91	0.89	0.84	0.89	0	1.20	1.73
7	0.87	0.77	0.95	0.88	0.85	0.90	1.15	10.39	5.48

2.4 模型概化

按照工程设计方案,研究区共设5万根光伏桩,考虑到网格密度及计算困难,采用分区域概化模型开展工程区波浪场分布与传播特性数值模拟。具体实施步骤如下:在光伏站提取5个子区域,位置见图1(b)(c)。各子区域包含9列光伏桩,其中编号Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别对应一期工程中的3个子区域,桩基数量分别为639(71×9)、693(77×9)、783(87×9)根。编号Ⅳ、Ⅴ对应二期工程,桩基数量为972(9×108)、1593(177×9)根。再针对各子区域分别构建局部波浪模型,采用网格加密技术精确刻画光伏桩的几何形态与平面布置,计算得到对应局部模型的波浪场分布及波高沿程变化规律。

当波浪由深水区传入浅水区时,波浪与底床的相互作用变大,底摩擦是造成波浪能量耗散的重要影响因素。故在概化模型时,根据各子区域局部波浪模型的波浪场分布,将光伏桩对波浪场分布的影响参数化,概化为底摩擦系数,并写入文件。采用迭代优化法确定底摩擦系数,即基于经验初步设定参数取值,代入模型开展模拟计算;再将模拟计算结果与实测数据进行对比分析,根据模拟结果逐步调整并最终率定最优参数。概化前后的底摩擦系数如图4所示,概化前的底摩擦系数随水深变化,取值范围为0.06~0.16 m;概化后的底摩擦系数作为概化模型的参数设置,其取值范围为0.06~1 m。

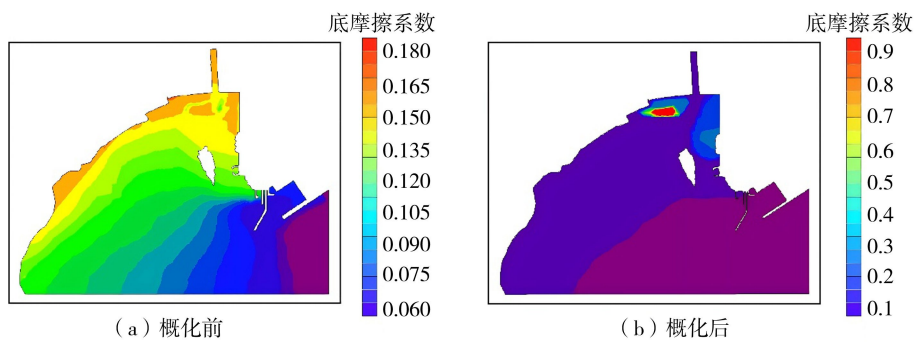


图4 概化前后底摩擦系数示意图

Fig.4 Schematic diagram of bottom friction coefficients before and after generalization

同时,对5个子区域概化模型设置由海向陆的沿程采样点,提取采样点的有效波高,并与局部精细波浪模型计算结果开展对比验证,以确保概化模型可以有效还原局部波浪模型的结果,从而保证概化模型精准模拟工程后波浪传播及场分布特征。波高拟合效果如图5所示。

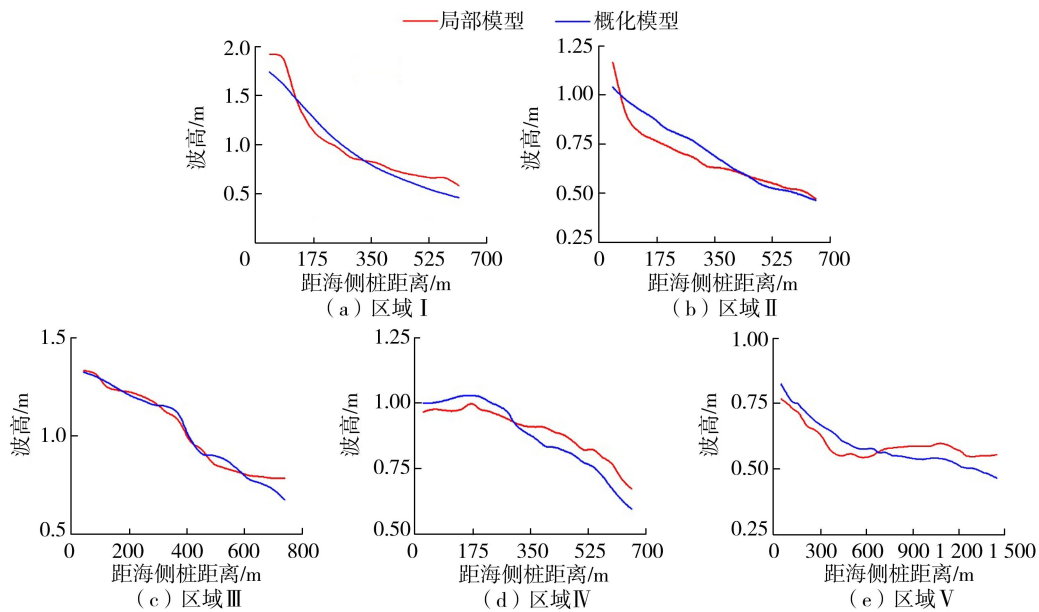


图5 波高对比

Fig.5 Comparison of wave heights

计算结果表明,区域Ⅰ~Ⅴ平均误差分别为8.06%、6.59%、2.85%、5.79%、4.42%,其中区域Ⅴ临近东

侧与北侧潮滩,波浪传播受地形起伏及防波堤影响显著,这也是该区域波高出现小幅振荡、演变规律存在一定差异的主要原因。整体而言,局部精细模型与概化模型的波高计算结果吻合度良好,整体误差较小,由海向陆的波高沿程变化趋势基本一致。可见,通过调整底摩擦系数构建的概化模型,能够较好概化工程区高密度群桩对波浪传播及波高分布的影响效应,模拟计算结果符合波浪传播基本理论,所建概化模型可靠、计算成果合理可信。

3 计算结果与分析

3.1 设计波要素与设计工况

北海预报中心于 2006 年 9 月 17 日设立了胶南董家口港区风、浪、潮观测设备安装地点。胶南董家口港区风、浪、潮观测站值班室位于董家口半岛南部,建筑高度约 15 m,光学测波仪和风向风速传感器均安装于此,观测站东面临海,周围无高大建筑物遮挡,地理坐标为 35°36′18″N、119°46′47″E。测波点水深为 7.3 m,海域开阔度 180°,波浪浮标位于观测点 SSE 向,直线距离约 1 200 m。潮位测点选择在贡口船坞码头内,验潮点坐标为 35°37′18″N、119°47′15″E,工程设计水位基于该站点全年实测观测数据计算确定。

波浪观测资料为每日 8 次定时观测,观测时间为 2、5、8、11、14、17、20、23 时;其中波型、波向仅开展日间 4 次观测,对应时间为 8、11、14、17 时。采用 2006 年 9 月至 2007 年 8 月实测波浪资料,对董家口海域波浪特征开展统计分析。结果表明,研究区海域常浪向以偏 SE 向为主,其波高分布特征如图 6 所示。结合研究区海域地理位置与湾口朝向,综合海区常浪向、强浪向分布特征可知,SSE、S 向波浪对工程项目最为不利。拟建项目位于棋子湾湾内,湾内波浪主要由南侧湾口传入,且湾内风成浪较小;研究区东侧离岸距离较近,同时受地形及防波堤影响,因此选取对研究区波浪影响最显著的 S 向作为波浪数值计算方向。

对于 S 向波浪,选取研究区邻近海洋站 12.8 m 水深处 16 a 的实测波高,采用 P-Ⅲ型频率计算法求得各重现期波高,并通过数值模拟方法反演外海 30 m 水深处不同重现期的波高。将研究区邻近海洋站历年 S 向 $H_{1/10}$ 最大波高从大至小排序成序列,再对该序列进行频率统计分析,得到各重现期 S 向的特征波高值,其中, $H_{1/10}$ 为将波高序列从大到小排序后取前 10% 的波高计算得到的平均值,对应的波高频率分析结果见图 7。

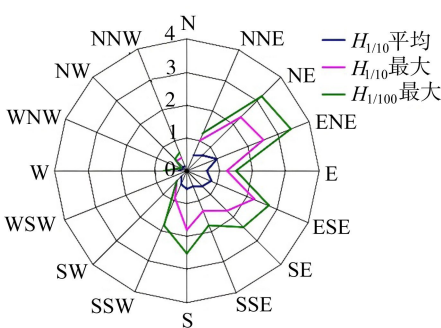


图 6 各向波高的分布 (单位:m)
Fig. 6 Directional distribution of wave heights (unit: m)

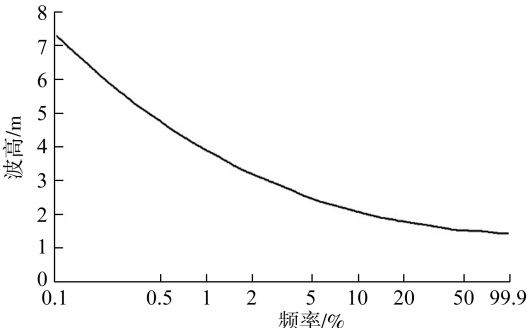


图 7 S 向年极值 $H_{1/10}$ 波高的 P-Ⅲ型曲线
Fig. 7 P-Ⅲ type curve of annual extreme $H_{1/10}$ wave height in S direction

基于以上分析,本文波浪推算共设置 4 个特征水位、4 个不同入射波高以及 4 种不同波周期作为设计波要素进行推算,对比分析不同设计工况下群桩对棋子湾内波浪场及波高变化的影响,观察波浪场分布变化规律。由于研究区在设计时以 50 a 重现期洪水工况为设计标准,故选取 50 a 重现期作为代表工况,设计波浪要素见表 2,其中 H_s 为有效波高; T_p 为谱峰周期。

3.2 不同工况下波浪场分布变化

3.2.1 水位对波浪的影响

由图 8(a)(b)可知,在同一重现期、相同入射波高与波周期条件下,随着水位抬升,波浪传播过程中波高整体呈增大趋势。当水位较低时,入射波浪更早进入浅水区,更容易受到地形及底摩擦的影响,波浪能量

表 2 设计波浪要素 (S 向波浪)
Table 2 Designed wave elements (S-directional waves)

重现期/a	H_s /m	T_p /s	设计水位/cm
100	5.90	18.03	329.5
50	5.40	16.70	317.5
25	4.80	15.26	305.5
1	1.02	5.03	197.5

衰减速率更快。50 a 重现期洪水设计水位较 1 a 重现期抬升幅度达 1.2 m, 波浪形态及等高线在传播过程中均产生了明显变化; 波浪传播至光伏站时, 波高平均增幅可达 0.4 m。

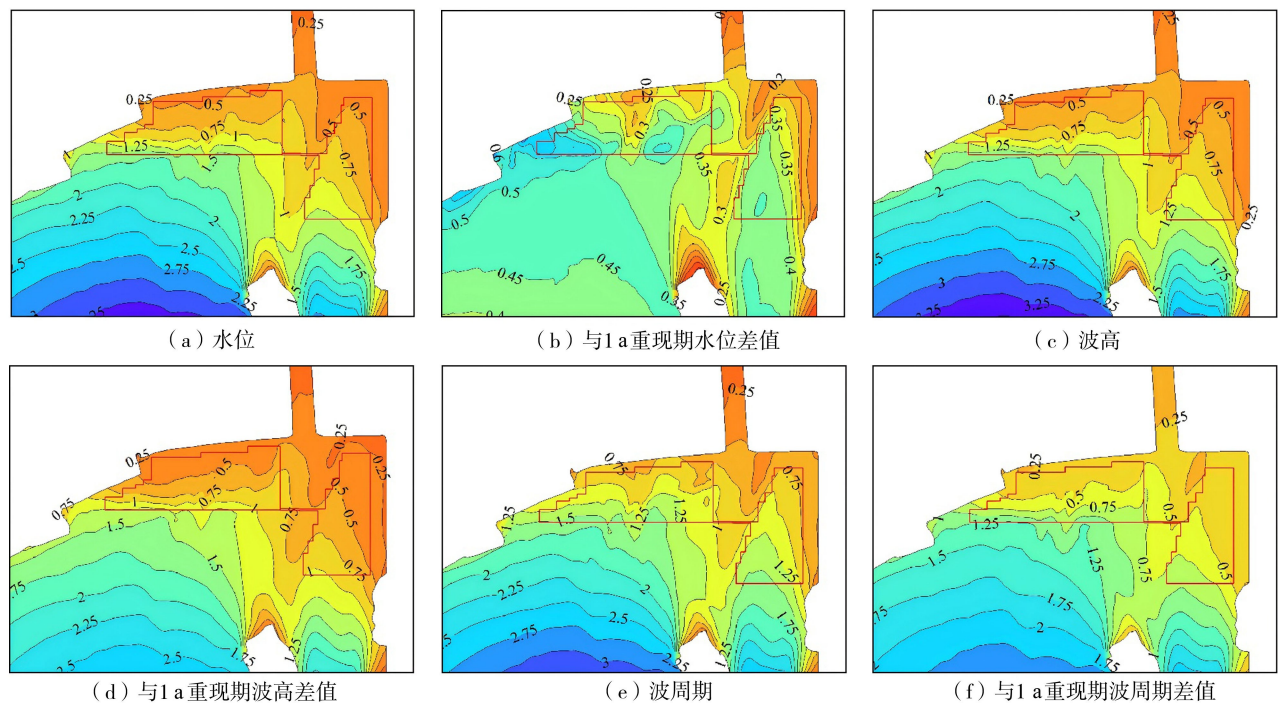


图 8 50 a 重现期波浪场分布 (单位:m)

Fig.8 Distribution of wave fields under 50-year return period (unit: m)

3.2.2 入射波高对波浪的影响

在同一水位与波周期条件下,入射波高与传播至光伏站的波高呈正相关关系,即入射波高增大时,光伏站波高也随之相应增大。对于 25、50、100 a 重现期的波浪情况,入射波高增幅较小,因棋子湾海域整体波浪场分布特征基本一致,湾内波高整体增幅平缓。由图 8(c)(d)可知,1 a 重现期波高较 50 a 重现期波高减小 4.38 m,该工况下波浪传播过程更为平缓,传播至光伏站时,波高仅为 0.3~0.5 m;尽管波浪形态及等高线的整体变化幅度不大,但波高分布特征与高重现期条件差异性明显。

3.2.3 波周期对波浪的影响

水位与入射波高相同时,波周期越大,波浪的能量衰减相对越平缓,能量的耗散带来的影响较小。大周期波浪因波长更长,与海底相互作用范围更大,单位传播距离内能量损失率也相对较低;而短周期波浪因频繁与海底作用,其波高及能量的衰减速率更快。由图 8(e)(f)可知,在 1 a 重现期波周期情况下,波浪在传递至光伏站时波高已大量消散,相比于 50 a 重现期波周期情况,波高平均减少了 0.6 m。

通过分析不同重现期水位、波高及波周期对波浪传播特性的影响,可见水位变化对波浪传播过程影响显著,较高水位条件下波浪衰减较慢,传递至光伏站时波高显著增大;而低水位时波浪会更早进入浅水区,受地形和底摩擦影响更为显著,波高衰减速率加快,传递至光伏站时波高已大量耗散,与高重现期工况差异明显。同时,入射波高的增大会直接导致光伏站波高相应增加,波高变化时对应的波浪形态及等高线虽然变化不大,但光伏站处波高分布差异性明显。波周期对波浪传播同样具有重要影响,长周期波浪因能量衰减慢、波长较长,单位传播距离能量损失较小,传递至光伏站时波高保持较好,而短周期波浪受底摩擦作用强烈,波高衰减更快,相较于长周期条件波高显著减少。

综合来看,水位、波高和波周期共同决定了波浪传播过程中的能量耗散和波高分布特征,高水位、大波高及长周期条件下波浪能量保持更好,影响相对较小,而低水位、小波高及短周期条件下波浪衰减更快,对光伏站的影响更为显著。

3.3 波浪场衰减率对比

选取 50 a 重现期作为典型代表工况,对群桩建设前后的波浪场进行对比分析,有无群桩影响的波高差值分布见图 9。可见,波浪由外海向近岸传播过程中,在抵达光伏站前,波高空间分布与传播规律基本一致,非

光伏站区域的波高差值基本趋近于 0。当波浪途经光伏站区域时,受密集群桩的阻挡与底摩擦共同作用,波浪能量耗散加剧,使得有效波高与最大波高的沿程衰减速率较工程前明显增大。相较于无群桩工况,光伏站址西侧、东侧区域波高平均分别减小 0.25、0.33 m;靠海侧波浪平均衰减率为 3%,至近岸处平均衰减率增大至 30%左右。

4 结 论

对不同重现期水文条件的波浪传播规律进行研究,结果表明,水位变化对波浪传播过程具有重要影响。较高水位时波浪衰减速度减缓,传递至光伏站的波高明显增大;较低水位时波浪提前进入浅水区,受地形和底摩擦的共同作用,波高在抵达光伏站前已快速衰减,与高水位工况差异显著。入射波高与光伏站区域波高呈正相关关系,虽然波浪整体形态与等深线分布未发生明显改变,但与光伏站区域波高分布特征存在明显差异。同时,波周期对波浪传播的影响同样显著,长周期波浪因能量衰减较慢、波长较长,单位距离能量损失较少,传递到光伏站时波高保持较好,而短周期波浪受到更多的底摩擦作用,波高衰减速率更快,最终光伏站区域波高较长周期工况显著减少。

光伏站的数值模拟结果显示,群桩建设对海湾波浪场的影响主要集中于站址内,对非群桩区域波浪场分布及传播影响较小。光伏群桩的修建对波浪传播具有显著的阻挡作用,导致光伏站区域波高较工程前明显衰减,且衰减规律呈现明显的空间分布特征,整体表现为由海向陆逐渐增大的趋势。在光伏站靠海侧,有、无群桩情况的有效波高差异较小,随着向岸线的靠近,群桩引起的波高衰减速率持续加快,波高差值不断拉大,在近岸处达到峰值。在 50 a 重现期的极端工况下,波高衰减率由靠海侧的 3% 逐渐增大至近岸侧的 30% 左右。

综上可得,水位、波高及波周期共同影响波浪的传播特性,光伏群桩的建设对波浪场的阻滞作用集中于光伏站区域,近岸波高衰减率显著高于离岸区,呈现明显的由海向陆逐渐递增的空间分布特征。可见,本文模拟方法在保证精度的同时,有效提升了大规模群桩数值模拟的计算效率,为近海光伏工程的波浪环境评估、群桩布局优化及防灾设计提供了科学依据。

参考文献:

[1] Yi Wen,Lin Pengzhi. Offshore solar photovoltaic potential in the seas around China[J]. Applied Energy,2024,376(Part B): 124279.

[2] 李顺,彭士涛,齐兆宇. 零碳港区建设与能源融合发展路径探析[J]. 水利经济,2025,43(2):90-99. (Li Shun,Peng Shitao, Qi Zhaoyu. Analysis on the development path of zero-carbon port area construction and energy integration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(2):90-99. (in Chinese))

[3] 曾桢,王溥,朱童. 海上风电与光伏发展现状、趋势与未来策略研究[J]. 科技促进发展,2024,20(9):749-760. (Zeng An, Wang Pu, Zhu Tong. Research on the current status, trends and future development strategy of offshore wind power and photovoltaic[J]. Science and Technology for Development,2024,20(9):749-760. (in Chinese))

[4] Ranjbaran P,Yousefi H,Gharehpetian G B,et al. A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,110:332-347.

[5] Crijns-Graus W,Wild P,Amineh M P,et al. International comparison of research and investments in new renewable electricity technologies;a focus on the European Union and China[J]. Energies,2022,15(17):6383.

[6] Olkkonen V,Haaskjold K,Klyve Ø S,et al. Techno-economic feasibility of hybrid hydro-FPV systems in Sub-Saharan Africa under different market conditions[J]. Renewable Energy,2023,215:118981.

[7] 徐卫兵,惠星,李东侠,等. 桩基固定式海上光伏项目开发建设策略[J]. 西北水电,2023(5):118-122. (Xu Weibing, Hui Xing,Li Dongxia,et al. Development and construction strategies for fixed offshore photovoltaic projects with pile foundation[J]. Northwest Hydro Power,2023(5):118-122. (in Chinese))

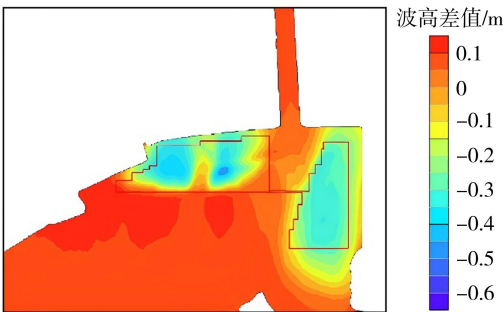


图 9 50 a 重现期有无群桩影响波高差值
Fig. 9 Wave height difference with and without pile foundations under 50-year return period

[8] Kong L S, Qi D M, Wan Y Y, et al. Numerical simulation of wave field in the Yangtze Estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(2):46-49.

[9] 王鑫,林鹏,陈晓路,等. 东海上风力机组基础冲刷机理数值模拟研究[J]. 太阳能学报,2021,42(12):239-244. (Wang Xin,Lin Peng,Chen Xiaolu,et al. Numerical simulation on scour mechanism of offshore wind turbine foundation in Rudong[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2021,42(12):239-244. (in Chinese))

[10] 薛玉娆,张金凤,张庆河,等. 桩码头桩群对水动力参数影响的数值模拟[J]. 水利水运工程学报,2024(5):95-102. (XueYurao,Zhang Jinfeng,Zhang Qinghe,et al. Numerical simulation of the impact of pile groups of high-pile wharves on hydrodynamic parameters[J]. Hydro-Science and Engineering,2024(5):95-102. (in Chinese))

[11] 谢友鸽,郭金运,朱金山,等. 基于 SWAN 模型的东沙岛海域有效波高模拟与分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版) 2016,35(3):17-24. (Xie Youge,Guo Jinyun,Zhu Jinshan,et al. Simulation and analysis of significant wave height over seas of Dongsha Island based on SWAN model[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition) 2016,35(3):17-24 (in Chinese))

[12] 张永强,孙永福,王恩康,等. 长乐海上风电场水动力影响数值模拟研究[J]. 海岸工程,2019,38(4):293-303. (Zhang Yongqiang,Sun Yongfu,Wang Enkang,et al. Numerical simulation of hydrodynamic influence in the Changle offshore wind farm [J]. Coastal Engineering,2019,38(4):293-303. (in Chinese))

[13] 邱妮珊,姚作芳,左秀玲,等. 于 SWAN 模型的西沙群岛永乐环礁波浪数值模拟与时空分析[J]. 地理科学进展,2024,43(9):1811-1825. (Qiu Nishan,Yao Zuofang,Zuo Xiuling,et al. Numerical simulation and spatiotemporal analysis of waves at Yongle Atoll,Xisha Islands based on SWAN modeling[J]. Progress in Geography,2024,43(9):1811-1825. (in Chinese))

[14] 周悦,董增川,徐伟,等. 基于 SWAN 模型的风生波河道防浪林消浪模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):323-328. (Zhou Yue,Dong Zengchuan,Xu Wei,et al. Wave attenuation simulation of vegetation based on SWAN model in rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(4):323-328. (in Chinese))

[15] 施凌,杨炜,胡华盛,等. 大范围波浪数值模拟研究[J]. 水道港口,2022,43(3):347-352. (Shi Ling,Yang Wei,Hu Huasheng,et al. Study on large scale wave mathematical model[J]. Journal of Waterways and Harbors,2022,43(3):347-352. (in Chinese))

[16] 洪新,李松霖,褚芹芹,等. 基于两种嵌套方案数值模拟烟台北部海域海浪的对比研究[J]. 海洋湖沼通报,2021,43(2):40-47. (Hong Xin,Li Songlin,Chu Qinqin,et al. A comparative study on the numerical simulation of offshore ocean wave based on two nesting method in Yantai[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2021,43(2):40-47. (in Chinese))

[17] 刘远超,袁博博,于倩. 港池长周期波浪振荡模态研究[J]. 水道港口,2020,41(4):397-403. (Liu Yuanchao,Yuan Bobo,Yu Qian. Long-period wave oscillation mode in harbor basin [J]. Journal of Waterway and Harbor,2020,41(4):397-403. (in Chinese))

[18] 姜冠男. 我国海上光伏产业现状及发展趋势分析[J]. 现代工业经济和信息化,2024,14(1):77-79. (Jiang Guannan. Analysis of the current situation and development trend of China's offshore photovoltaic industry[J]. Modern Industrial Economy and Informatization,2024,14(1):77-79. (in Chinese))

[19] 张振伟,刘必劲,邹志利,等. 高阶 Boussinesq 型水波方程色散和变浅性能的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):37-44. (Zhang Zhenwei,Liu Bijin,Zou Zhili,et al. Improvement of dispersion and shoaling property of a set of high-order Boussinesq-type equations[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):37-44. (in Chinese))

[20] 刘凡,陆小敏,徐丹,等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):387-393. (Liu Fan,Lu Xiaomin,Xu Dan,et al. Research progress of ocean waves forecasting method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):387-393. (in Chinese))

[21] Yang J,Shaer C A,Heath L S. The SWAN user's manual,version 1. 1[M]. Blacksburg:Virginia Polytechnic Institute and State University,1995.