DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0181

# 波流耦合作用下珠江口潮流波浪能评估

刘 迪[1,2]，宋子俊[1,2]，李泽宇[3]，卢才武[1,2]，郭 梨[1,2]

（1.西安建筑科技大学 资源工程学院，陕西 西安 710055；2.西安市智慧工业感知计算与决策重点实验室，陕西 西安 710055；3.西安科技大学 能源学院，陕西 西安 710054）

**摘 要：**本文考虑波流耦合效应，使用 Mike21 FM 与 Mike21 SW 模块，结合 ERA5 再分析数据，对珠江口区域 2014 年至 2024 年 10 年间的潮流与波浪特征进行模拟，从时间和空间维度对潮流能与波浪能进行联合评估，并对能量等级进行区域划分，最后讨论了波流耦合效应对能量评估的影响。结果表明：珠江口波流呈明显的区域不对称性分布特征，且每年 6 月至 9 月均值较高。该区域潮流能与波浪能秋冬季丰富，春夏季相对匮乏。且大部分海域属于潮流能贫乏四类区，年平均潮流能功率密度低于 0.8 kW/m$^2$。而波浪能除近岸浅海区之外，大部分海域属于可利用区，年平均波浪能功率密度在 2 kW/m 以上，最高可达 30 kW/m。同时，波流耦合效应会对波流要素产生 2% 至 15% 的差异，进而导致 3% 至 8% 的能量计算偏差。

**关键词：**能源评估；波流耦合；功率密度；潮流能；波浪能

**中图分类号：**P743.2；P743.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1007-6336(2026)04-0537-11

## Estimation of tidal-wave energy at the Pearl River Estuary under tidal-wave coupling

Liu Di[1,2], Song Zijun[1,2], Li Zeyu[3], Lu Caiwu[1,2], Guo Li[1,2]

(1.School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2.Xi'an Key Laboratory of Perceptive Computing and Decision for Intelligent Industry, Xi'an 710055, China; 3.School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract**: This study investigates tidal and wave characteristics in the Pearl River Estuary from 2014 to 2024 using the Mike21 FM and SW modules, incorporating ERA5 reanalysis data, with consideration of wave–current interaction effects. A joint assessment of tidal and wave energy is conducted from both temporal and spatial perspectives, and energy levels are classified into regional categories. The influence of wave–current coupling on energy estimation is also analyzed. Results indicate that tidal and wave patterns exhibit significant regional asymmetry, with higher monthly means observed from June to September. Tidal and wave energy resources are more abundant during autumn and winter, but relatively scarce in spring and summer. Most offshore areas are classified as Class IV (energy-poor) for tidal energy, with annual mean tidal energy density below 0.8 kW/m$^2$. In contrast, wave energy is generally exploitable across most offshore regions (excluding shallow nearshore zones), with annual average wave energy density exceeding 2 kW/m and peak values reaching up to 30 kW/m. Furthermore, wave–current interactions induce 2%-15% differences in hydrodynamic parameters, leading to 3%-8% deviations in energy calculations.

**Key words**: energy assessment; wave-current coupling; power density; tidal energy; wave energy

在全球化石能源日趋紧缺的背景下，有效评估并高效利用海洋可再生能源，已成为全球各国普遍关注的焦点[1]。我国海岸线较长，蕴藏着丰富的海洋能源[2]。其中，珠江口潮流能和波浪能

**收稿日期：**2025-12-01，**修订日期：**2026-01-19

**基金项目：**国家自然科学基金面上项目（52474179）；国家自然科学基金项目（52404140）；陕西省自然科学基金项目（2023-JC-QN-0687）

**作者简介：**刘迪（1987—），女，陕西咸阳人，副教授，主要从事海洋水动力、尾矿库水资源利用方面的研究，E-mail: liudi@xauat.edu.cn

具有能量密度高、可预测性强、环境影响小等优势，因此，对其进行全面评估尤为重要[3-4]。

珠江口海洋能评估的准确性面临独特挑战。其挑战主要源于极为复杂的水动力环境，作为典型的强波流相互作用河口，喇叭状的地形与星罗棋布的岛屿导致潮流与波浪的传播、变形及耗散过程呈高度非线性特点。具体而言，在近岸浅水区，波浪辐射应力梯度可产生稳定的波致流，从而改变潮流动力学过程[5]；同时，背景流场也会通过多普勒效应影响波浪的传播与能量耗散[6]。这意味着，在珠江口这类水动力条件复杂的河口区域，将潮流能与波浪能孤立评估的传统研究方法可能产生显著偏差。

近年来，数值模拟已成为海洋能资源评估的主流且有效的方法。在潮流能方面，国内外学者已对荷兰海岸[7]、德国北海[8]、美国缅因湾[9]及我国舟山群岛[10-12]、平潭岛周边[13]等海域开展了较为详尽的评估。在波浪能方面，类似研究也广泛见于美国[14]、加拿大[15]沿海及我国涠洲岛[16]、南海北部[17]等海域。尽管这些研究已经大幅推进了潮流能与波浪能的评估工作，但多数研究仍集中于单一能源类型的评估，或将波浪与潮流作为独立过程处理，未能充分考虑类似复杂河口环境中显著的波流耦合效应。这可能导致对实际可用能源潜力的高估或低估，特别是对珠江口这类强波流相互作用的海域。

因此，本文考虑波浪辐射应力与背景流场的相互影响，以珠江口为研究区域，构建了基于 Mike21 FM 与 Mike21 SW 的波流耦合数值模型，旨在揭示珠江口特定地形下波流耦合效应对潮流场与波浪场的调制作用。并在此基础上，从时空尺度系统评估了该区域 2014 年至 2024 年 10 年间的潮流能与波浪能分布特征。相较于以往侧重于单一能源或采用非耦合模型的评估方法，本研究充分考虑了波流间的非线性相互作用，有望提供更符合珠江口实际水动力条件的资源评估结果，从而为后续的工程选址与能源开发提供更可靠的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 Mike21 模型

Mike21 FM 模块是 Mike 系列软件模块中最核心的模块之一，在笛卡尔坐标系中的三维控制方程是以 Boussinesq 和静水压力为假设，以三维不可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes 方程为基础，通过积分运算得到的浅水局部连续性方程[18-19]。

局部连续性方程如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h_u}{\partial x}+\frac{\partial h_v}{\partial y}=h_S \tag{1}$$

$x$、$y$ 分量的水平动量方程如下：

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y}=f\bar{v}h-gh\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}}{\rho_0}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_0}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})+hu_S S \tag{2}$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y}=f\bar{u}h-gh\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}}{\rho_0}-\frac{\tau_{by}}{\rho_0}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{yx})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})+hv_S S \tag{3}$$

式中：$S$ 为源汇项流量（$m^2/s$）；$h$ 为总水深（m），$h=\eta+d$，其中，$\eta$ 为水位（m），$d$ 为静止水深（m）；$\rho$ 为水体密度（$kg/m^3$）；$\tau_{sx}$、$\tau_{sy}$ 为 $x$、$y$ 方向上的风应力（$N/m^2$）；$\tau_{bx}$、$\tau_{by}$ 为 $x$、$y$ 方向上的底部摩擦力（$N/m^2$）。

Mike21 SW（Spectral Waves）模块主要用于模拟近岸和海岸区域的波浪状况。该模块基于非结构化网格技术，能够精准且高效地计算波浪的生成、传播、衰减、变形以及波浪与水流、地形的相互作用[20]。Mike21 SW 模块包含参数化解耦公式与完全型谱公式，两种公式均基于波作用守恒方程，基本守恒方程在小区域模拟时可采用笛卡尔坐标系计算，在大区域模拟时则可采用球坐标系计算[21]。Mike21 SW 模型控制方程可表示如下：

$$\begin{aligned}&\frac{\partial N}{\partial t}+\nabla\cdot(\vec{v}N)=\frac{S}{\sigma},\\&(C_x,C_y)=\frac{d\vec{x}}{dt}=\vec{C_g}+U,\\&C_\sigma=\frac{d_\sigma}{d_t}=\frac{\partial\sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t}+\vec{U}\cdot\nabla_{\vec{x}}d\right]-C_g\vec{k}\cdot\frac{\partial\vec{U}}{\partial S},\\&C_\theta=\frac{d\sigma}{dt}=-\frac{1}{k}\left[\frac{\partial\sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial m}+\vec{k}\cdot\frac{\partial\vec{U}}{\partial m}\right]\end{aligned} \tag{4}$$

式中：$N$ 为波谱能量密度（$m^2\cdot s$）；$t$ 为时间（s）；$\nabla$为微分算子（$m^{-1}$）；$\vec{v}$为波群速度（m/s）；$S$ 为源汇项流量（$m^2/s$）；$\sigma$ 为相对频率（rad/s）；$C_x$、$C_y$、

$C_\theta$、$C\sigma$ 为波群在四维相空间中的传播速度(m/s)；$\theta$ 为波向(rad)；$m$ 为垂直于 $S$ 的坐标。

### 1.2　区域概况及数据来源

研究区域范围为 112°80′E—114°50′E，21°70′N—23°10′N，南北跨度 147.8 km，东西最大跨度达 118.7 km，计算区域面积达 8970 km$^2$。在珠江口南部及外海区域设置 $8\times10^{-4}$ m$^2$ 的大面积网格，浮标站周边海域设置 $8\times10^{-5}$ m$^2$ 的加密小网格(图 1)，生成节点数为 8755 个、网格数为 13616 个的非结构型网格。

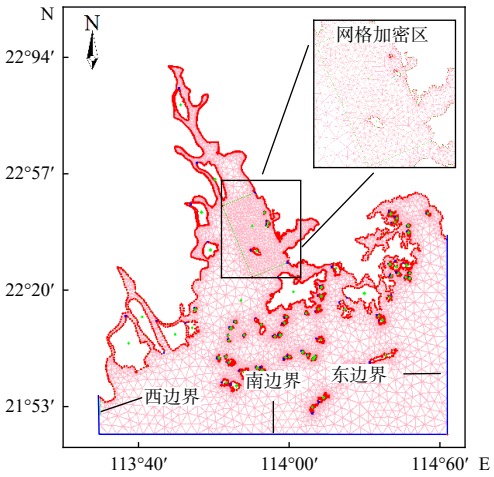


**图 1　研究区域网格划分及加密操作**

Fig. 1　Studies regional meshing and encryption operations

加密区水深数据来源于 2024 年 4 月实测水深与地形数据。其余区域水深数据采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的空间分辨率为 1°×1°的全球地形地表高程数据集(ETOPO1)。模型风场资料采用欧洲中期天气预报(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)提供的 ERA5 再分析风场数据。模型率定和验证数据来自验潮站与浮标站的实测数据。每个网格节点的水深数据由节点周围 6 个水深散点数据加权平均求得，插值后的水深分布如图 2 所示。

### 1.3　模型参数及耦合实验

为了明确波浪辐射应力与背景流场的相互作用，本文将背景潮流所引起的流速、水位变化耦合至波浪模块，同时将波浪辐射应力所带来的流场效应叠加在潮流模拟过程中，实现双向波流耦合机制。并设置 2 组对照实验、4 种模拟情形，定量揭示波浪场与潮流场之间的耦合作用。具体实验设计列于表 1。

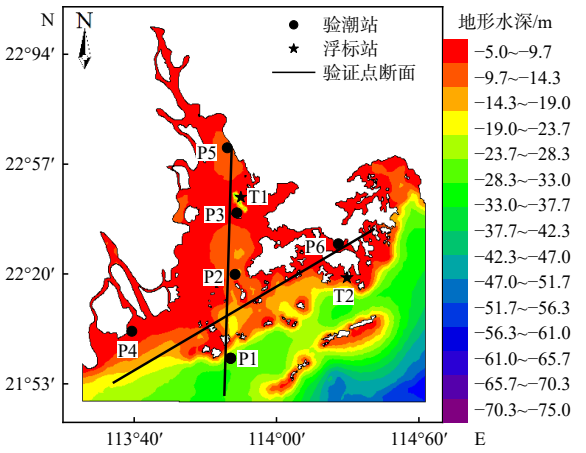


**图 2　研究区域插值后的水深**

Fig. 2　bathymetric map of the study area interpolated

**表 1　波流耦合模拟实验设计**

Tab.1　Wave-current coupled simulation experiment design

| 实验 | 模拟情形 | 驱动条件 | 输出项 |
|---|---|---|---|
| 潮流场对照组 | M 1 | 无波浪辐射应力 | 流速 |
| | M 2 | 耦合波浪场 | 流速 |
| 波浪场对照组 | M 3 | 无背景流场驱动 | 波高、波周期 |
| | M 4 | 耦合潮流场 | 波高、波周期 |

模型采用 UTM-49 投影坐标系，潮位基准面参考平均海平面下 31 cm 的 1985 国家高程基准面。由于研究区域位于干湿交替区，因此潮流模型设置了干湿边界，干水深为 0.005 m，淹没水深为 0.05 m，湿水深度为 0.1 m[22]。研究海域是典型的半日潮主导海域，M2 分潮的振幅和能量贡献占绝对主导地位，且模拟时间序列长达 10 年，为了简化模型提高模拟效率，在不影响计算精度的前提下，边界条件由外海 M2 分潮的水位插值而得[23]。基于 Mike21 FM 和 Mike21 SW 默认值和实测潮流波浪数据对模型进行率定，率定后的参数列于表 2。

### 1.4　模型验证

#### 1.4.1　潮流验证

为了验证耦合模型在时间与空间上的适用性与模拟精度，按照水深由浅到深，地理位置由河口到外海的分布选取 P1 至 P6 验潮站以及 T1、T2 浮标站进行模型验证，具体位置如图 2 所示。

模拟时间为 2014 年 1 月 1 日 00:00 至 2024 年 1 月 1 日 00:00, 验证时间从 2022 年 6 月持续至 2023 年 9 月, 验证要素包括潮位、流速、风速、风向、有效波高、平均波周期与平均波向。

**表 2 潮流、波浪模型率定参数取值**

Tab.2 Parameter values for the tidal and wave model

| 模型模块 | 参数名称 | 取值 | 参数作用 | 率定依据 |
|---|---|---|---|---|
| 潮流模型 | 曼宁系数 | 32 | 海底摩擦阻力 | 依据潮流数据率定, 在28 ~ 35范围内率定所得 |
| | 涡粘系数 | 0.28 | 水平湍流混合强度 | 结合潮位、流速率定所得 |
| | 松弛因子 | 0.1 | 数值求解稳定性 | 采用模型默认推荐值, 保证计算收敛 |
| 波浪模型 | 能量转换系数 | 0.25 | 风能输入效率 | 依据波高实测数据, 在0.008 ~ 1.0范围内率定 |
| | Cdis | 4.5 | 波量耗散率 | 结合波高、波周期观测数据率定 |
| | DELTAdis | 0.59 | 白帽破碎临界条件 | 依据波高、波周期、波向等要素率定所得 |

注: 各参数主要依据Mike 21 FM和SW科学手册推荐范围及实际观测潮位、潮流、风场及波浪数据率定结果所得

收集 6 个验潮站(P1—P6)2022 年 6 月 15 日 00:00 到 2022 年 7 月 15 日 00:00 的潮位时序数据及 2022 年 7 月 5 日 21:00 到 2022 年 7 月 7 日 03:00 的流速时序数据进行验证, 验证曲线如图 3 所示。

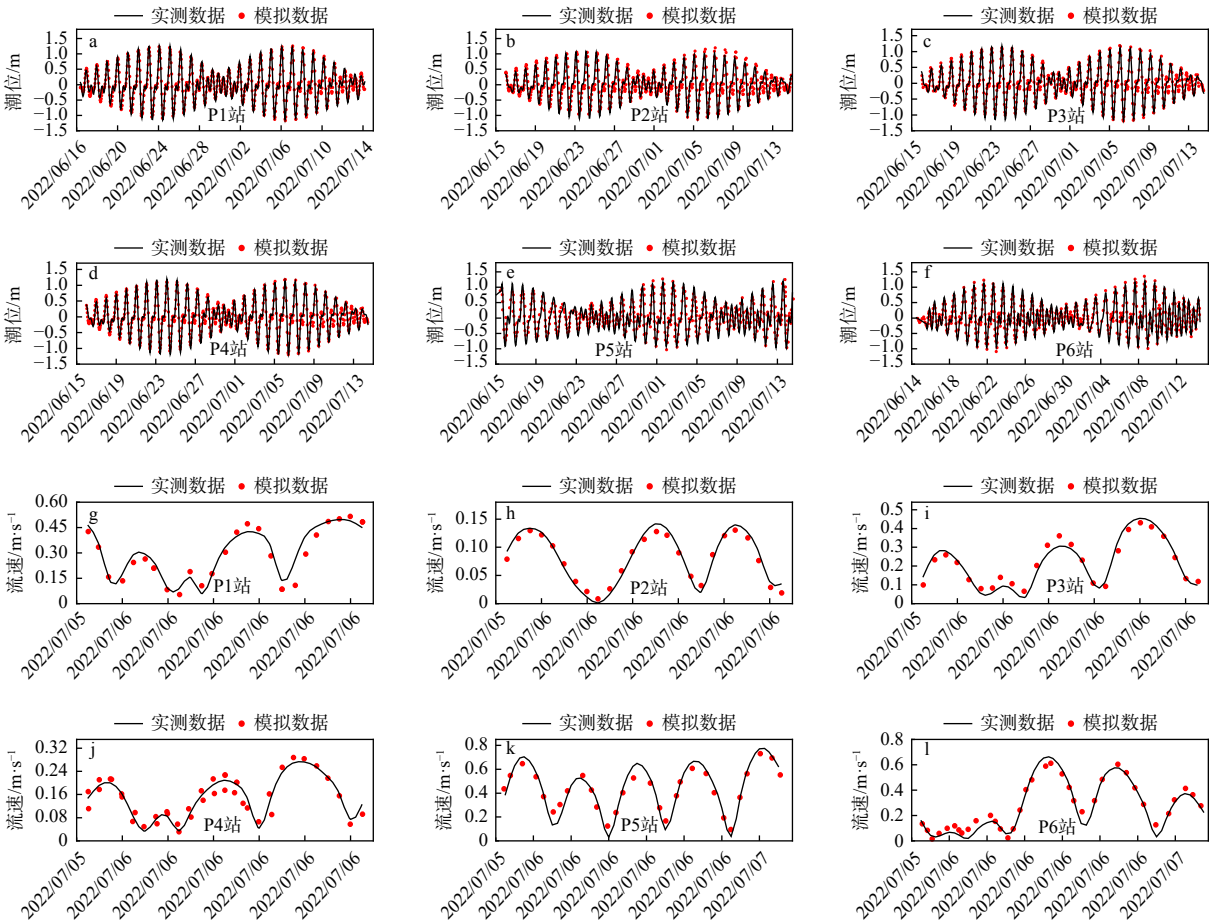


**图 3 P1—P6 潮位、流速验证曲线**

Fig. 3 Tide level and current speed verification curves for P1 to P6

### 1.4.2　风场验证

采用 ERA5 风场数据驱动模型，并收集加密网格区域浮标观测站 T1 处的 2022 年 6 月 28 日至 8 月 28 日实测风场时序数据，以及赤湾浮标观测站 T2 处 2023 年 8 月 21 日至 9 月 2 日不同时期的风场时序数据进行验证，验证结果如图 4 所示。

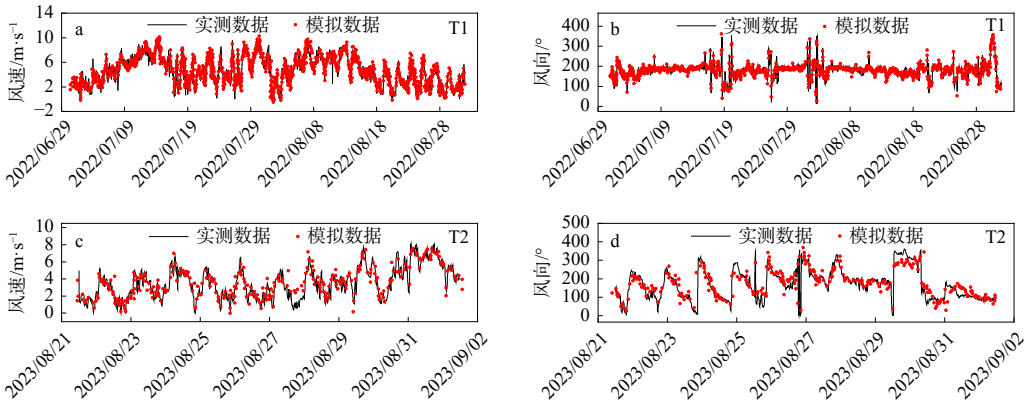


**图 4　浮标站风速、风向验证曲线**

Fig. 4　Wind speed and direction verification curve of buoy station

### 1.4.3　波浪模型验证

将潮流模型的结果文件导入波浪模型，并结合风场条件驱动波浪模型。模拟结束后，输出 T1 浮标站 2022 年 12 月 30 日至 2023 年 2 月 1 日及 T2 浮标站 2023 年 5 月 30 日至 7 月 1 日的模拟波浪时序数据，并与实测波浪时序数据进行拟合，拟合结果如图 5 所示。

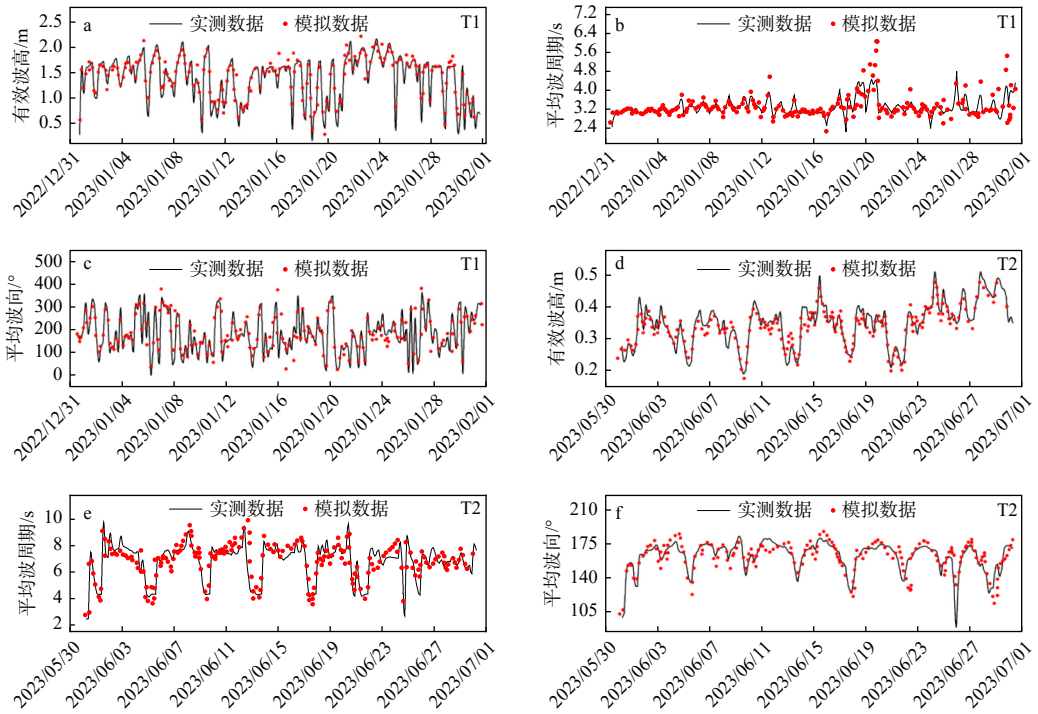


**图 5　波浪要素验证曲线**

Fig. 5　Wave element verification curve

为进一步说明拟合效果，对各要素的均方误差（*MSE*）、平均绝对误差（*MAE*）、均方根误差（*RMSE*）和决定系数（$R^2$）进行计算，计算结果列于表 3。结果显示，各要素的 *MSE*、*MAE* 和 *RMSE* 均表明拟合效果良好，与实测数据的差异较小，模拟数据与实测数据的决定系数（$R^2$）均在 0.9 以上。拟合曲线吻合度较高、峰值接近、相位准确，进一步表明 ERA5 再分析风场数据能够有效驱动波流耦合模型，且该耦合模型能够准确模拟珠江口潮流波浪特征。

**表 3 波流各要素验证结果指数统计**

Tab.3 Verification result index statistics of wave and current elements

| 指数 | 流速/m·s$^{-1}$ | 风速/m·s$^{-1}$ | 有效波高/m | 有效波周期/s |
|---|---|---|---|---|
| *MSE* | 0.02 | 1.47 | 0.07 | 0.08 |
| *MAE* | 0.07 | 0.63 | 0.11 | 0.12 |
| *RMSE* | 0.11 | 1.21 | 0.26 | 0.28 |
| $R^2$ | 0.93 | 0.89 | 0.9 | 0.91 |

## 2 结果与讨论

### 2.1 潮流与波浪特征

#### 2.1.1 潮差与流速分布特征

潮差与流速是评估潮流能的主要因子。潮差是指一个潮汐周期内，高潮位与低潮位之间的垂直水位差。根据潮流模拟结果，统计 4 个验潮站 10 年的月平均潮差（$H_m$）和月平均流速（$V_m$）时序数据（图 6）。从空间尺度来看，桂山岛站、内伶仃岛站和三灶岛站 $H_m$ 极值大于 3 m，峰值可达 3.22 m，而大万山岛站 $H_m$ 极值小于 3 m。从时间尺度来看，4 个站点 $H_m$ 均超 2 m，其中 6 月至 9 月 $H_m$ 较大。4 个站点 $V_m$ 均维持在 0.3 m/s 至 0.7 m/s 之间，且 6 月至 8 月 $V_m$ 较大，其中内伶仃岛站 $V_m$ 峰值最高，可达 0.62 m/s。

为进一步分析年际潮差与流速变化，图 7a 和图 7b 分别给出了年平均潮差（$H_a$）与年平均流速（$V_a$）的空间分布情况。珠江口 $H_a$ 整体介于 0.6 m 至 2.5 m 之间，其中，中南部如香港岛南侧、公洲湾及石排湾一带 $H_a$ 较大，峰值可达 2.55 m。流速方面，受瓶颈状河口地形约束，$V_a$ 展示出明显的河口水动力不对称特点。具体表现为：河口外部开阔海域 $V_a$ 较低，常年在 0.1 m/s 至 0.75 m/s 之间，而内部河口区如内伶仃岛、四湾、南边湾及沙湾附近 $V_a$ 较高，峰值可达 0.85 m/s。

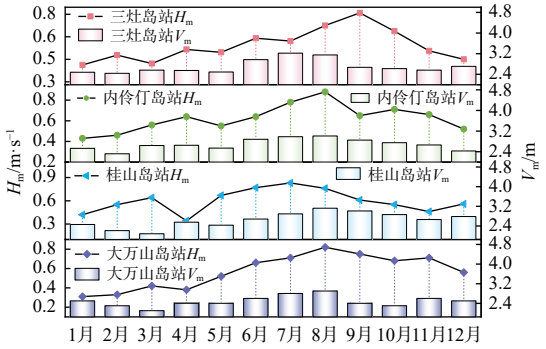


**图 6 4 个验潮站月平均潮差和月平均流速**

Fig. 6 The monthly average tidal range and monthly average current speed of the four tide gauge stations

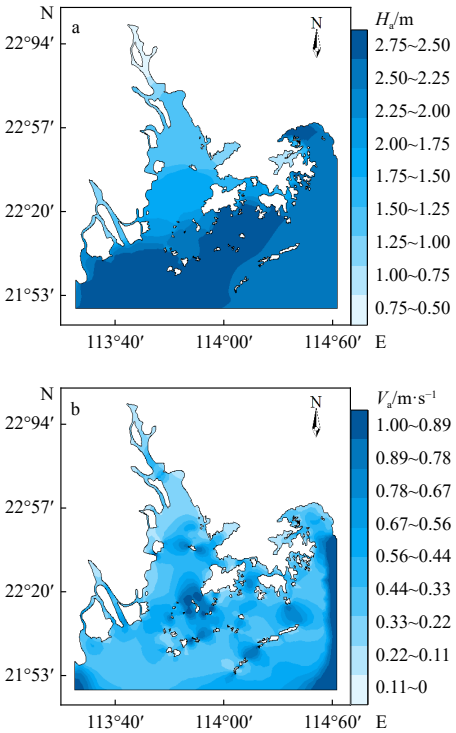


**图 7 珠江口区域年平均潮差和年平均流速**

Fig. 7 Annual average tidal range map and annual average current speed map in the Pearl River Estuary area

#### 2.1.2 波浪特征分布规律

有效波高和波周期是评估波浪能的主要因子。图 8a 和图 8b 为 4 个典型验潮站的月平均有效高波（$H_{sm}$）和月平均波周期（$T_m$）雷达图。图 8 显示，有效波高季节性波动显著，而波周期

季节性波动较小。具体来看，1 月至 7 月，各验潮站 $H_{sm}$ 稳定在 1.0 m 至 2.0 m 之间；8 月至 9 月，$H_{sm}$ 最大，峰值可达 2.7 m；10 月至 12 月，各验潮站 $H_{sm}$ 回落但仍保持较高水平，稳定在 1.5 m 至 2.0 m。4 个验潮站的 $T_m$ 全年稳定在 6 s 至 8 s 之间。其中 1 月至 6 月，$T_m$ 变化平缓；7 月至 8 月，部分验潮站 $T_m$ 轻微增大；9 月至 12 月恢复稳定。

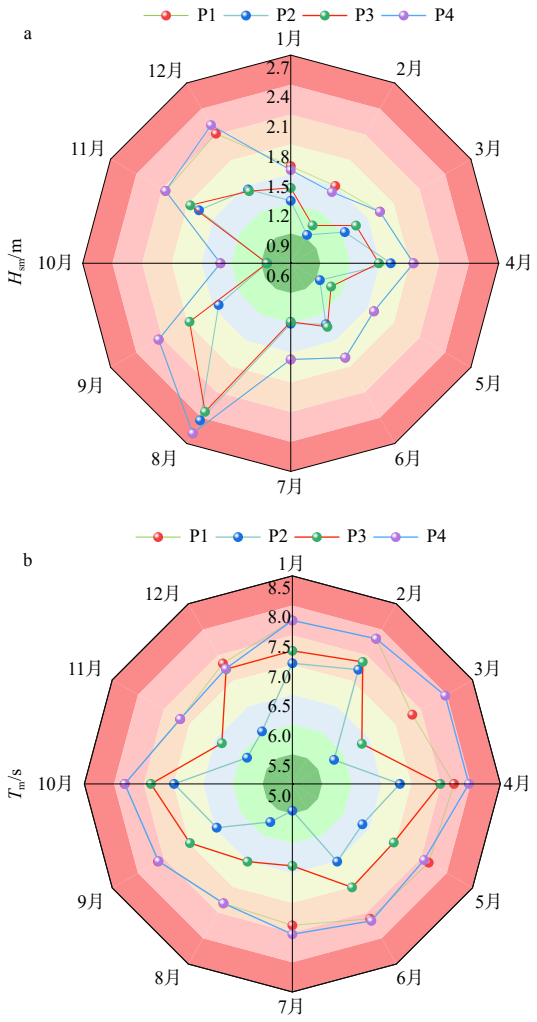


**图 8　4 个验潮站月平均有效波高和月平均波周期**

Fig. 8　Monthly average significant wave height and wave period from four tide stations

为进一步分析珠江口年际波浪要素特征变化，图 9a 和图 9b 分别给出了年平均有效波高 ($H_{sa}$) 与年平均波周期 ($T_a$) 的空间分布情况。珠江口区域的 $H_{sa}$ 整体在 0.4 m 至 2.25 m 之间波动。其中，珠江河口内部伶仃洋海域 $H_{sa}$ 相对较小，珠江口西侧边界及桂山岛南部外海区域 $H_{sa}$ 较大，整体超过 1.35 m，峰值可达 2.25 m。波周期方面，珠江河口内部狮子洋区域 $T_a$ 低于 4 s，波周期变化幅度较小；而伶仃洋及南部外海区域由北向南 $T_a$ 逐渐从 4 s 增至 7.5 s 以上，其中石排湾与沙湾连线南部区域的 $T_a$ 超过 7.8 s。

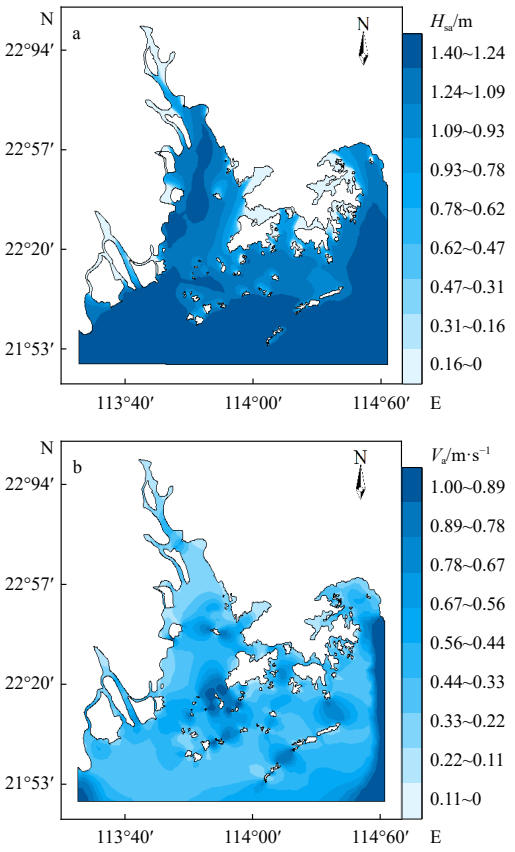


**图 9　珠江口年平均有效波高和年平均波周期**

Fig. 9　Map of the average significant wave height and annual average wave period in the Pearl River Estuary

## 2.2　潮流能、波浪能评估

### 2.2.1　平均潮流能功率密度 ($P_c$) 分布特征

从潮流能功率密度的角度来评估潮流能开发潜力，是现在评估潮流能的主要方法。$P$ 为潮流能功率密度，其物理意义为单位时间通过单位面积的潮流动能。$P$ 与该点流速的立方成正比[24]，具体计算公式如下：

$$P = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^3 \qquad (5)$$

式中：$P$ 为潮流能功率密度(kW/m$^2$)；$\rho$ 为海水密度(kg/m$^3$)；$\overline{V}$为平均流速(m/s)。

由于潮流流速随时间变化且本研究模拟时

间较长，为了更准确地计算潮流能功率密度，本研究参考武贺等[13]对于平均潮流能功率密度($P_c$)的计算方式，将流速在某段时间进行积分来计算某段时间内的 $P_c$，计算公式如下：

$$P_c = \frac{1}{2}\rho \int_{t_0}^{t_0+T} \overline{V}^3 dt \quad (6)$$

式中：$P_c$ 为平均潮流能功率密度(kW/m$^2$)；$t_0$ 为初始时刻(s)；$T$ 为平均时段(s)。

表 4 统计了 P1 至 P4 验潮站 4 个季节平均潮流能功率密度($P_{cs}$)以及年平均潮流能功率密度($P_{ca}$)。从时间尺度来看，P1 至 P4 验潮站在秋、冬季 $P_{cs}$ 较大，春、夏季相对较小。其中 P3 验潮站秋季的 $P_{cs}$ 最高，可达 0.249 kW/m$^2$。从年际角度来看，P3 验潮站的 $P_{ca}$ 最高，为 0.142 kW/m$^2$，P4 验潮站的 $P_{ca}$ 最低，为 0.113 kW/m$^2$。

**表 4 4 个验潮站平均潮流能功率密度统计**

Tab.4 Statistics of tidal energy power density of four tide stations

| 验潮站 | $P_{cs}$ /kW·m$^{-2}$ | | | | $P_{ca}$ /kW·m$^{-2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | |
| P1 | 0.024 | 0.084 | 0.231 | 0.147 | 0.122 |
| P2 | 0.087 | 0.138 | 0.215 | 0.076 | 0.129 |
| P3 | 0.061 | 0.121 | 0.249 | 0.137 | 0.142 |
| P4 | 0.053 | 0.098 | 0.197 | 0.101 | 0.113 |

从空间尺度来看，珠江河口瓶颈状地形以及南部岛屿对流速的突变作用使得 $P_{ca}$ 分布特征(图 10)与 $V_a$ 分布特征(图 7b)基本一致。$P_{ca}$ 整体介于 0.001 kW/m$^2$ 至 0.55 kW/m$^2$ 之间。其中，在四湾、南边湾、小东湾附近 20 km 内，$P_{ca}$ 较高，峰值可达 0.55 kW/m$^2$，如图 10 中的 Y1 至 Y5 区域；内伶仃岛、公洲湾、沙湾、白槽湾附近的 $P_{ca}$ 次之，均值超过 0.45 kW/m$^2$；在珠江入海口、狮子洋北部以及珠江口两侧海岸线区域，$P_{ca}$ 较低，平均不超过 0.001 kW/m$^2$。

2.2.2 平均波浪能功率密度 ($P_w$) 分布特征

平均波浪能功率密度($P_w$)表示单位波前宽度上的波浪能功率，是现在评估波浪能资源的主要参数，与波高的平方和波周期成正比，用如下公式[25]来表示：

$$P_w = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f,h) S(f,\theta) \mathrm{d}f \mathrm{d}\theta \quad (7)$$

式中：$P_w$ 为平均波浪能功率密度(kW/m)；$\rho$ 为海水密度(kg/m$^3$)；$g$ 为重力加速度(m/s$^2$)；$C_g(f, h)$为波群速度(m/s)；$S_g(f, \theta)$为波浪谱密度[m$^2$/(Hz·rad)]。

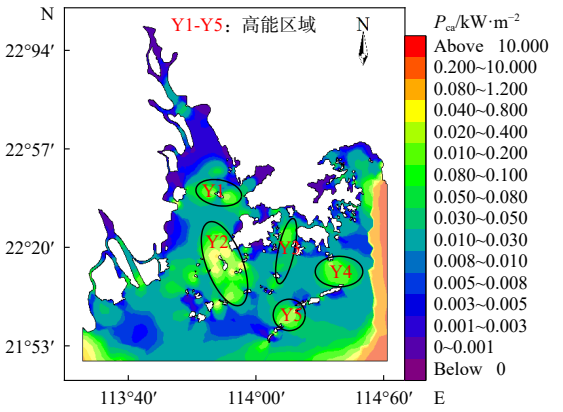


**图 10 珠江口年平均潮流能功率密度分布**

Fig. 10 Distribution map of annual average tidal energy power density in the Pearl River Estuary

当水深进一步增大时，$P_w$ 的计算可简化为如下公式[26]：

$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_c H_S^2 \quad (8)$$

式中：$T_c$ 为能量周期(s)。

该研究中模型波浪谱选择 JONSWAP 谱，$T_c$ 在此浪谱时为 0.9 $T_p$，得到 $P_w$ 的简化方程如下：

$$P_w = 0.43 H_S^2 T_p \quad (9)$$

式中：$T_p$ 为平均波周期(s)。

表 5 统计了 P1 至 P4 验潮站 4 个季节平均波浪能功率密度($P_{ws}$)以及年平均波浪能功率密度($P_{wa}$)。从时间尺度来看，4 个验潮站在秋、冬季的 $P_{ws}$ 较大，秋季 $P_{ws}$ 可达 17.0 kW/m；冬季次之，可达 13.2 kW/m；春、夏季 $P_{ws}$ 相对较小，整体不超过 11.3 kW/m。这与珠江口秋、冬季风场特点相符合，秋、冬季风速较大，风浪作用较强，导致波高较大，进而影响波浪能的空间分布。从空间尺度来看，P1 站和 P4 站的 $P_{wa}$ 较高，波浪能资源储量较高，峰值可达 12.7 kW/m；P2 站和 P3 站 $P_{wa}$ 次之，波浪能资源储量较低，分别为 7.4 kW/m 和 6.2 kW/m。

图 11 为珠江口整体区域的 $P_{wa}$ 空间分布。从空间尺度来看，珠江口 $P_{wa}$ 呈现由两岸沿线向伶仃洋中间递增、由北向南递增的特点。具体来说，珠江口北部包括香港岛与澳门连线断面以北至狮子洋区域，$P_{wa}$ 整体变化不大，稳定在

4.2 kW/m 至 8.5 kW/m 之间。靠近岸边与岛屿的地区，受地形限制，波浪破碎和波能衰减增强，$P_{wa}$ 较小，最低为 5 kW/m。香港岛与澳门连线断面南部区域，$P_{wa}$ 分布（图 11）与 $T_a$（图 9b）分布相似，由北向南从 10 kW/m 逐步增大至 20 kW/m，局部海域最高可达 30 kW/m。

**表 5　4 个验潮站平均波浪能功率密度统计**

Tab.5　Statistical table of wave energy power density at four tide stations

| 验潮站 | $P_{ws}$/kW·m$^{-1}$ | | | | $P_{wa}$/kW·m$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | |
| P1 | 9.3 | 11.3 | 17.0 | 13.2 | 12.7 |
| P2 | 5.5 | 6.2 | 11.1 | 6.7 | 7.4 |
| P3 | 4.3 | 5.7 | 9.2 | 5.7 | 6.2 |
| P4 | 9.4 | 11.2 | 17.0 | 12.8 | 12.6 |

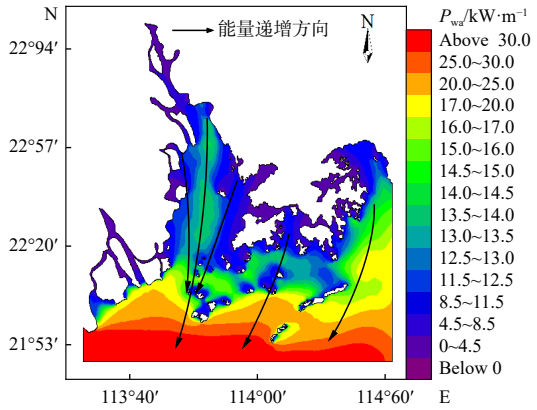


**图 11　珠江口年平均波浪能功率密度分布**

Fig. 11　Distribution map of annual average wave energy power density in the Pearl River Estuary

## 2.3　潮流波浪能资源等级划分

近年来，我国对于潮流能的等级划分主要依据大潮年平均潮流功率密度（$P_m$）、波浪能的等级划分依据 $P_{wa}$ 来进行。根据 2022 年颁布的《海洋能电站选址技术规范 第 1 部分：潮流能》（GB/T 41341.1—2022）[27] 和《海洋能电站选址技术规范 第 2 部分：波浪能》（GB/T 41341.2—2022）[28] 对于海洋能等级划分标准，我国近海潮流能资源按照 $P_m$ 被划分为丰富一类区（$P_m$>8 kW/m$^2$）、较丰富二类区（8 kW/ m$^2$>$P_m$>4 kW/ m$^2$）、可利用三类区（4 kW/ m$^2$> $P_m$>0.8 kW/ m$^2$）及贫乏四类区（$P_m$<0.8 kW/ m$^2$）。波浪能等级按照 $P_{wa}$ 划分为丰富区（$P_{wa}$>6 kW/ m）、较丰富区（6 kW/ m>$P_{wa}$>4 kW/ m）、可利用区（4 kW/ m>$P_{wa}$>2 kW/ m）及贫乏区（$P_{wa}$<2 kW/ m）。

$P_m$ 计算公式如下：

$$P_m = \frac{1}{2}\rho\overline{V_m}^3 \qquad (10)$$

式中：$P_m$ 为大潮期年平均潮流功率密度（kW/m$^2$）；$\rho$ 为海水密度（kg/m$^3$），$\overline{V_m}$ 为大潮期最大平均流速（m/s）。

依据此划分等级要求，进一步计算了珠江口区域的 $P_m$ 分布情况，并按照此标准对珠江口区域的潮流能富集程度进行了区域划分（图 12a）；同时根据波浪能划分标准对珠江口 $P_{wa}$ 分布（图 11）作了进一步波浪能等级区域划分（图 12b）。图 12a 显示，珠江口区域大部分海域 $P_m$ 小于 0.8 kW/m$^2$，潮流能相对匮乏，属于贫乏四类区，其开发意义较小。潮流能资源可利用区与相对富集区集中在内伶仃岛、香港离岸区群岛、担杆列岛以及佳蓬列岛周边海域，局部海域 $P_m$ 超 8 kW/m$^2$，具有较高的利用价值，并呈现出能量由岛内向岛外扩散减弱的特点。图 12b 显示，珠江口波浪能资源分布广泛，波浪能资源开发区面积较大。大多数河口浅海区域 $P_{wa}$ 低于 2 kW/m，波浪能资源属于匮乏区；伶仃洋水道及香港南部附近海域 $P_{wa}$ 在 2 kW/m 至 4 kW/m 之间，属于波浪能可利用区；河口以外风区较长的南部外海波浪能资源密集，$P_{wa}$ 普遍高于 6 kW/m，属于波浪能资源富集区，开发利用价值较高。

## 2.4　波流耦合效应对潮流能与波浪能评估的影响

流速、有效波高和平均波周期是潮流波浪能评估的重要影响因子。为进一步明确波流耦合效应对各因子以及能量评估的影响，对比 M1 与 M2 的流速模拟结果以及 M3 与 M4 的有效波高和平均波周期模拟结果，计算了典型验潮站波流耦合效应偏差（表 6），并绘制了各因子的波流耦合效应偏差空间分布图（图 13）。

图 13a 给出表层年平均流速变化率的空间分布。在内伶仃岛东西两侧、香港离岸区附近岛屿之间的水道，流速因波浪辐射应力调制而增强，增幅可达 8%～12%；而在北部近岸波浪破碎区及南部开阔海域，耦合效应导致流速普遍衰减，衰减幅度为 2%～5%。这一变化直接导致 $P_{ca}$ 计算出现偏差，表 6 显示在不同水深及不同

河口位置的验潮站处，考虑波流耦合后，$P_{ca}$ 变化幅度最高可达 6.8%。这进一步说明忽略耦合效应会影响潮流能计算精度。

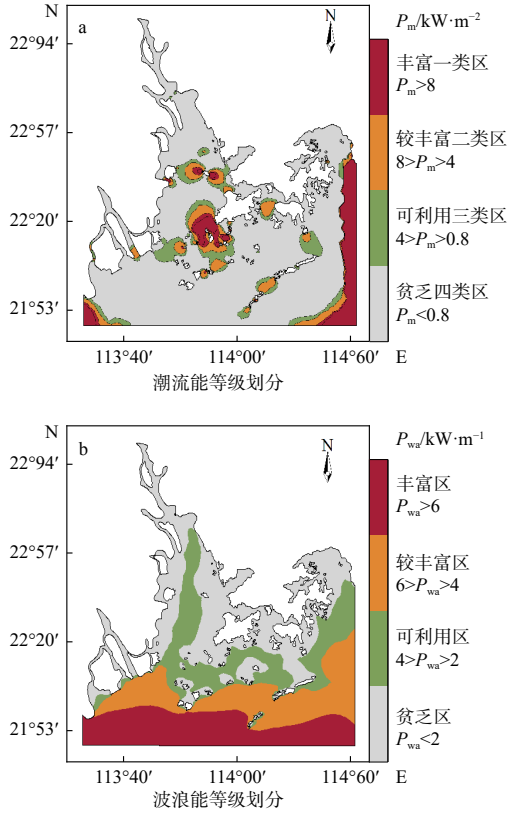


**图 12 珠江口潮流能、波浪能等级划分空间分布**

Fig. 12 Spatial distribution of the classification of tidal energy and wave energy resources in the Pearl River Estuary

**表 6 典型验潮站波流耦合效应偏差**

Tab.6 Deviation of wave-current coupling effect at typical tidal stations

| 站点 | 波流要素耦合效应偏差/% | | | 能量耦合效应相对偏差/% | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 流速 | 有效波高 | 平均波周期 | $P_{ca}$ | $P_{wa}$ |
| P1 | −7.4 | −6.6 | −6.2 | −5 | −6 |
| P2 | 10.6 | 9.4 | 4.4 | 6.8 | 7.1 |
| P3 | 4.8 | 7.3 | 8.3 | 3.5 | 7.8 |

注：表中效应偏差计算公式为：(耦合后要素值−耦合前要素值)/耦合前要素值×100%，其中负值代表衰减，正值代表增强

年平均有效波高变化率(图 13b)与年平均波周期变化率(图 13c)空间分布情况显示，波流耦合会导致珠江口南部区域波高和波周期衰减，北部区域增强，且有效波高的耦合偏差强度更大。由于波流逆向作用，在潮流强劲的北部河口区，耦合后波浪要素呈增强趋势，其中有效波高增幅为 9%～15%，平均波周期增幅为 4%~10%，其中虎门、蕉门、磨刀门外侧及主要潮汐通道增幅最大。而在南部部分波流同向的开阔海域，耦合效应导致有效波高和平均波周期呈衰减趋势，且有效波高衰减幅度更大。从表 6 中的数据可以看出，与耦合后的 $P_{wa}$ 相比，耦合效应带来的 $P_{wa}$ 偏差由北到南依次减弱，其中在北部内伶仃岛附近的 P3 处 $P_{wa}$ 偏差高达 7.8%，在南部开阔海域的 P1 处 $P_{wa}$ 偏差高达 6%。由此可见，波流耦合效应对波浪能评估的准确性至关重要。

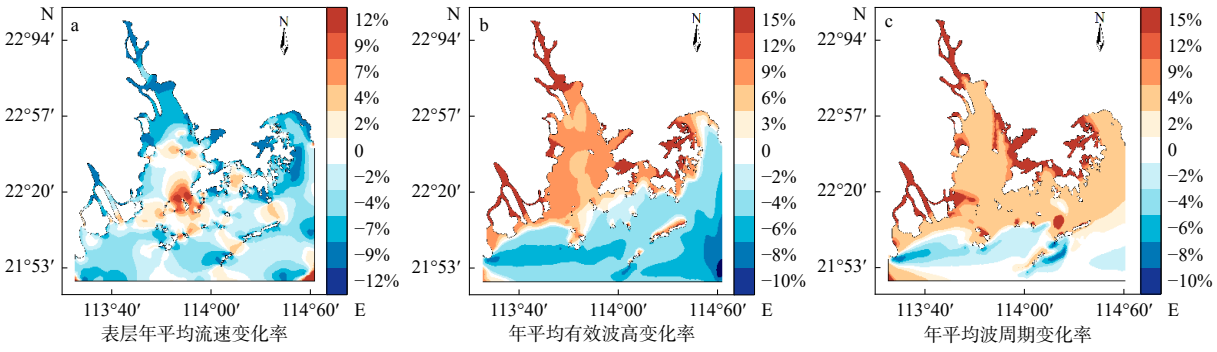


**图 13 波流耦合效应偏差空间分布**

Fig. 13 Wave-current coupling effect deviation spatial distribution map

## 3 结 论

(1)潮差与流速受地形影响呈明显的空间不对称性。且 6 月至 9 月较大，峰值潮差达 3.22 m，峰值流速达 0.62 m/s。年平均波高和年平均波周期分布呈内、外河口分异特征，且 7 月至 9 月月

平均波高和波周期较大，其余月份较低。

（2）珠江口区域潮流能与波浪能资源较为丰富的季节为秋、冬季，较为匮乏的季节为春、夏季。年平均潮流能密度介于 0.001 kW/m$^2$ 至 0.55 kW/m$^2$ 之间，年平均波浪能密度由北向南从 10 kW/m 逐步增大至 20 kW/m，局部海域最高可达 30 kW/m。

（3）珠江口区域大部分海域潮流能相对匮乏，只有局部海域属于潮流能丰富区。珠江口内部河口年平均波浪能密度较低，属于波浪能贫乏区，河口以外南部海域大部分区域年平均波浪能密度较高，属于波浪能可开发区域。

（4）波流耦合效应会对流速、有效波高以及平均波周期产生 2% 至 15% 的增强与衰减作用，因而导致潮流能与波浪能的计算出现 3% 至 8% 的偏差，进而影响能量评估的准确性。

（5）该研究在模拟中未施加河口径流作用，且驱动条件简化为 M2 分潮，这可能会造成近岸水动力的局部偏差。未来工作将重点优化波流耦合模型，系统开展网格分辨率与关键参数的敏感性分析，以提升模型在复杂海岸环境中的适用性及海洋能源评估的可靠性。

## 参考文献：


[1] 褚景春, 贾法勇. 中国海洋潮流能发电技术与装备现状、新的机遇与挑战 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 668-674.

[2] 王　燕, 刘邦凡, 赵天航. 论我国海洋能的研究与发展 [J]. 生态经济, 2017, 33(4): 102-106.

[3] 施伟勇, 王传崑, 沈家法. 中国的海洋能资源及其开发前景展望 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 913-923.

[4] Su M, Lin Z X, Wang C, et al. Geomorphologic and infilling characteristics of the slope-confined submarine canyons in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Marine Geology, 2020, 424: 106166.

[5] Yang J L, Jiang S C, Wu J S, et al. Effects of wave-current interaction on the waves, cold-water mass and transport of diluted water in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(1): 25-40.

[6] Warner J C, Armstrong B, He R Y, et al. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system[J]. Ocean Modelling, 2010, 35(3): 230-244.

[7] Alday M, Lavidas G. Assessing the tidal stream resource for energy extraction in the Netherlands[J]. Renewable Energy, 2024, 220: 119683.

[8] Korte A, Windt C, Goseberg N. Review and assessment of the German tidal energy resource[J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2024, 10(1): 239-261.

[9] Deb M, Yang Z Q, Wang T P, et al. Turbulence modeling to aid tidal energy resource characterization in the Western Passage, Maine, USA[J]. Renewable Energy, 2023, 219(Pt 1): 118694.

[10] 王智峰, 周良明, 张弓贲, 等. 舟山海域特定水道潮流能估算 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2010, 40(8): 27-33.

[11] 侯　放, 于华明, 鲍献文, 等. 舟山群岛海域潮流能数值估算与分析 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 125-133.

[12] 方舣洲, 武　贺. 舟山群岛海域主要水道潮流能资源评估方法与分析 [J]. 地理信息世界, 2022, 29(5): 118-124.

[13] 武　贺, 杨鉴宇, 朱丽宁. 平潭岛周边海域潮流能资源特性分析与评估 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 494-502.

[14] 顾振华, 顾　晨, 姚鹏程. 东中国海潮汐能分布数值模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022(11): 165-171.

[15] Kilcher L, Medina G G, Yang Z Q. A scalable wave resource assessment methodology: application to U. S. waters[J]. Renewable Energy, 2023, 217: 119094.

[16] Dong C, Huang G, Cheng G H, et al. Regionalized ensemble estimation of wave periods for assessing wave energy resources across Canada. Part II: wave-period and wave-energy analyses[J]. Ocean & Coastal Management, 2024, 259: 107458.

[17] 姜　波, 丁　杰, 方舣洲, 等. 涠洲岛海洋风能和波浪能资源评估 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 461-466.

[18] Yu J Z, Liu D, Wang X, et al. A transition zone boundary determining method based on MIKE21: a case study of Baiyangdian Lake, North China[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131447.

[19] Wong H L, Teo F Y. Hydrodynamic modelling and shape optimisation of second-generation coastal reservoirs in consideration of algal bloom occurrence[J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 26(4): 8735-8771.

[20] Ti Z L, Zhang M J, Li Y L, et al. Numerical study on the stochastic response of a long-span sea-crossing bridge subjected to extreme nonlinear wave loads[J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109287.

[21] Xiang Y, Fu Z M, Meng Y, et al. Analysis of wave clipping effects of plain reservoir artificial islands based on MIKE21 SW model[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(3): 179-187.

[22] 孙　健, 陶建华. 潮流数值模拟中动边界处理方法研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2007, 22(1): 44-52.

[23] Guo Z, Cao A Z, Lyu X Q, et al. Impact of multiple tidal forcing on the simulation of the $M_2$ internal tides in the northern South China Sea[J]. Ocean Dynamics, 2020, 70(2): 187-198.

[24] 郑志南. 海洋潮流能的估算公式 [J]. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1987, 8(2): 37-44.

[25] 王宏基. 山东半岛波浪能资源的调查与模拟分析研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

[26] 曹飞飞, 覃小苏, 李妍妮, 等. 山东半岛附近海域风、浪能资源联合评估 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 603-610.

[27] GB/T 41341.1—2022 海洋能电站选址技术规范 第 1 部分：潮流能 [S].

[28] GB/T 41341.2—2022 海洋能电站选址技术规范 第 2 部分：波浪能 [S].