基于FVCOM-FABM-ERSEM模型的海南岛近岸海域赤潮发生模拟研究

王维航[1,2]， 刘必劲[1,2]， 国 振[1,2]

（1.浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2.浙江大学 海南研究院, 海南 三亚 572018）

摘 要: 本文基于 FVCOM-FABM-ERSEM 耦合模型, 构建了海南岛近海海域生态动力模型, 系统研究了赤潮暴发的过程。针对 ERSEM 浮游植物生长模块, 引入乘法交互模型增强生长多样性, 耦合泥沙光衰减和盐度抑制提升河海过渡带模拟精度。结果表明, 水动力结果与实测吻合, 模型成功再现营养盐和浮游植物群落分布特征。研究揭示了赤潮暴发全过程: 首先, 南渡江营养盐输入、强湍流强度和低温下浮游植物的弱吸收共同维持高营养背景; 然后, 水温骤升解除生长抑制, 促使球形棕囊藻快速增殖并成为优势种; 最后, 单细胞聚集形成囊体, 导致赤潮现象的发生。相关性分析表明水温是赤潮暴发的主要驱动因子。通过调整生长参数, 该模型可以应用到更加广泛的海域, 为赤潮预警提供科学依据。

关键词: 赤潮; 水动力; 生态动力模型; 球形棕囊藻

中图分类号: X143; X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2025)05-0641-12

Simulation study of red tide occurrence in the coastal waters off Hainan Island based on the FVCOM-FABM-ERSEM model

WANG Weihang[1,2], LIU Bijin[1,2], GUO Zhen[1,2]

(1.Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2.Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572018, China)

Abstract: This study establishes an eco-hydrodynamic model for the coastal waters off Hainan Island using the coupled FVCOM-FABM-ERSEM framework, aiming to systematically investigate the process of red tide outbreaks. To enhance the diversity of phytoplankton growth dynamics in the ERSEM module, a multiplicative interaction model is introduced. In addition, sediment-induced light attenuation and salinity inhibition are incorporated to improve the accuracy of simulations in estuarine transition zones. Model results show good agreement with observations, successfully reproducing the distribution patterns of nutrients and phytoplankton communities. The study reveals the full progression of a red tide event: initially, nutrient input from the Nandu River, strong turbulence, and low temperatures limit phytoplankton uptake, maintaining a high-nutrient background; subsequently, a rapid rise in water temperature lifts growth inhibition, triggering a bloom of *Phaeocystis globosa*, which quickly becomes the dominant species; eventually, single cells aggregate into colonies, leading to the formation of a red tide. Correlation analysis indicates that water temperature is the

收稿日期: 2025-03-12, **修订日期:** 2025-04-28

基金项目: 海南省科技专项（ZDYF2023SHFZ119）

作者简介: 王维航（1999—）, 男, 广东云浮人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生态修复和海洋生态灾害预警报, E-mail: 1724864336@qq.com

通信作者: 刘必劲（1984—）, 男, 福建福州人, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生态环境保护技术与装备研究, E-mail: liubijin@zju.edu.cn

primary driver of the outbreak. With parameter adjustments, the model can be applied to a wider range of marine environments, providing a scientific basis for red tide forecasting and early warning systems.

Key words: red tide; hydrodynamics; eco-dynamic model; *Phaeocystis globose*

随着全球经济的快速发展,海洋资源开发和农业规模化生产活动增加,工农业废水及生活污水排放量剧增,致使海南省近岸海域生态系统面临严重污染压力。海南省生态环境厅 2020—2022 年统计数据显示,海南岛最大入海河流南渡江流域内 6 个市县农业种植化肥年流失量达 7547.4 吨,局部河段出现营养盐超标现象[1]。过量的营养盐经河川径流输入近海后,受海洋环流驱动形成区域性扩散,引发河口及邻近海域富营养化,并促进浮游植物异常增殖,破坏海洋生物群落结构稳定性,而且在特定水文气象条件下诱发赤潮,导致渔业资源衰退与旅游经济损失。

赤潮的发生与水体富营养化程度加剧存在较强相关性,在温度、光照等环境要素适宜的条件下,富营养化水体中的赤潮藻类能在短时间内异常增殖并聚集,引发赤潮现象。据统计,截至 2010 年,海南岛近岸共记录到赤潮灾害 32 起[2],2010—2017 年,赤潮共发生 16 起,而仅 2024 年就记录到赤潮灾害 3 次[3],赤潮发生频率呈现增长趋势。根据历史赤潮事件空间分布,海口近岸海域中的海口湾、澄迈湾和铺前湾等均为赤潮高发区。

赤潮发生机制作为现代海洋科学领域的核心议题,研究人员主要采用水样调查[4]、卫星遥感影像解译[5] 和数值模拟[6] 等方法监测赤潮的发生。传统水样调查方法虽能获取基础水质参数,但高采样成本制约了监测效率。卫星遥感影像技术虽能为赤潮监测提供重要数据支撑,但云层覆盖、太阳耀斑和水中有色可溶性有机物的存在显著降低了叶绿素的反演精度[7]。更重要的是,卫星遥感影像仅能提供赤潮表观特征,难以解析驱动赤潮形成的底层生态动力学过程。相较于卫星遥感监测,数值模型根据水动力−生态过程耦合机制,构建机理驱动,不仅能解析赤潮生消的关键驱动因子,更能实现赤潮生消过程的动态预测。

当前赤潮预测模型构建以水动力−生态耦合框架为主要发展方向,即在 ROMS、FVCOM 等水动力框架上耦合 NPZD、CoSiNE 及 ERSEM 等生态动力学模型进行深度融合,通过考虑物理传输与生物地球化学循环之间的相互作用,实现赤潮生消过程的三维动态预测。如 Shee 等[8] 基于 ROMS-NPZD 耦合模型,分析了反气旋和极地西边界流输入引起的浮游植物生物量增长。郭琳[9] 基于 ROMS 建立了一个含有两种浮游植物的 CoSiNE 生态动力模型,研究了加利福尼亚流系生态要素的时空分布特征。Akbarinia 等[10] 基于 ROMS-NPZD 建立波斯湾生物地球化学模型,揭示了营养盐、浮游植物丰度和叶绿素浓度等生态要素的季节性演变规律。施沈阳等[11] 通过 FVCOM-ERSEM 构建了长江口三维海洋生态动力模型,再现了长江口锋面区的生态特征。然而,当前生态动力模型的构建普遍存在适应性不足的问题,多数研究直接套用未经本地化重构的通用模型,未能针对目标海域赤潮藻类的生理特性进行模型优化。以温度响应为例,现有模型通常假设浮游植物群体具有同质化温度敏感性,而实际上不同藻类的最适温度、高温抑制性和低温活性等存在显著差异[12]。这种生理特性若未被精准刻画,将导致赤潮发生过程的模拟产生系统性偏差。因此,基于研究区域内生物种群特性对模型的生理过程进行校准,是提升生态动力模型精度的必要前提。

海南海域生态系统建模研究尚处于起步阶段,其理论支撑与技术方法体系尚未完善,当前监测体系依赖浮标在线监测与人工采样结合的灾后响应模式,难以突破监测滞后性和预测前瞻性不足等技术瓶颈,严重影响了海南海洋生态灾害预测预警效能。作为海洋大省,海南省的渔业与旅游业高度依赖近海生态环境的稳定性,而频发的赤潮灾害对近海养殖业和滨海旅游业构成重大威胁,急需提升本省的赤潮预测预警能力构建生态安全防线。在此背景下,构建海南岛近岸海域生态动力学模型体系具有重要现实意义,成

为赤潮生态灾害防控的迫切需求。本文通过整合水动力过程、生物地球化学循环机制及赤潮生物种群生理特性构建了生态动力模型，分析营养盐输移−藻类增殖−赤潮暴发的过程，为建立智能化赤潮预警平台提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　FVCOM 模型

海洋水动力模型作为海洋环流数值模拟的核心工具，已在海洋科学研究中得到广泛应用，当前主流的海洋环流模型主要有 POM、ROMS、FVCOM 等。其中，FVCOM 模型基于非结构网格有限体积法对控制方程进行求解，具有灵活的网格划分能力和复杂边界适应性，在近岸海域水动力过程模拟中展现出显著优势，特别适用于陆架海区多尺度动力过程的数值模拟。基于上述优势，本研究选取 FVCOM 作为基础框架，构建研究海域的高精度三维水动力数值模型，为后续生态模型研究提供可靠的水动力输入。

FVCOM 控制方程组由动量守恒方程、质量连续方程、温度输运方程、盐度输运方程及海水状态方程构成：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}-fv=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial z}\right)+F_u \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}+fu=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial z}\right)+F_v \tag{2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z}=-\rho g \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_h\frac{\partial T}{\partial z}\right)+F_T \tag{5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}+u\frac{\partial S}{\partial x}+v\frac{\partial S}{\partial y}+w\frac{\partial S}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_h\frac{\partial S}{\partial z}\right)+F_S \tag{6}$$

$$\rho=\rho(T,S) \tag{7}$$

式中：x、y、z 分别表示东、北和竖直坐标轴；u、v、w 是 x、y、z 方向上的速度分量；T 为温度；S 为盐度；ρ 为密度；P 为压强；f 为科氏参量；g 为重力加速度；K_m 为垂直旋转黏性系数；K_h 为热量垂直旋转扩散系数；F_u 代表 u 方向上的水平动量扩散；F_v 代表 v 方向上的水平动量扩散；F_T 代表热量扩散；F_S 代表盐度扩散。

1.2　ERSEM 生态模型

ERSEM 作为典型的结构化生态系统动力学模型，以碳、叶绿素 a、磷酸盐、硝酸盐等生物地球化学要素为核心状态变量，完整地刻画了海洋浮游生物群落演替、底栖生物代谢及沉积物−水界面物质交换等复杂生态过程[13]。该模型涵盖初级生产者（浮游植物）、消费者（浮游动物）及分解者（异养细菌）三大生物群类，能够反映海洋食物网能量传递与营养物质流动情况（见图 1）。在非生物过程方面，ERSEM 集成了沉积物再悬浮、碳酸盐系统平衡及有机质矿化−埋藏耦合机制，能够准确模拟出悬浮物的动态平衡过程。

ERSEM 采用多模块耦合技术构建生态系统模拟框架，将整体系统划分为浮游植物光合作用、浮游动物摄食、底栖生物扰动等 9 个独立功能模块。各模块基于生物地球化学基本定律进行过程计算，既可独立运行分析单一生态过程的作用机制，亦可依据研究区域特征自由组合以提升模型的区域适应性[14]。在数学表达层面，ERSEM 通过偏微分方程组构建状态变量的时空演化控制方程为：

$$\frac{\partial c_p}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial c_p}{\partial x}+w_{sed}^{c_p}\frac{\partial c_p}{\partial z}=v\frac{\partial^2 c_p}{\partial x^2}+\left.\frac{\partial c_p}{\partial t}\right|_{bgc} \tag{8}$$

$$\frac{\partial c_b}{\partial t}=\left.\frac{\partial c_b}{\partial t}\right|_{bgc} \tag{9}$$

式中：c_p 为每种有机物和无机物中主要化学成分的浓度；c_b 为底栖生物含量；$w_{sed}^{c_p}$ 为水柱中粒子的重力沉降速度；$\boldsymbol{x}$ 表示空间坐标向量；z 为垂直坐标，在海面处为 0，向下递增。

本研究在 ERSEM 源模型框架基础上，针对近岸海域浮游植物群落生长−消亡动态过程的模拟需求，作了以下 4 个方面改进。

（1）光衰减过程优化：通过修正河流泥沙的短波辐射吸收系数与向后散射系数，构建包含陆源悬浮物影响的水体光传输模型，实现河口区域光合作用强度的空间差异化模拟。

（2）温度响应机制：针对 ERSEM 源模型单一 Q10 温度响应函数存在的生态适应性局限[15]，本研究基于不同浮游植物生长速率对温度的典

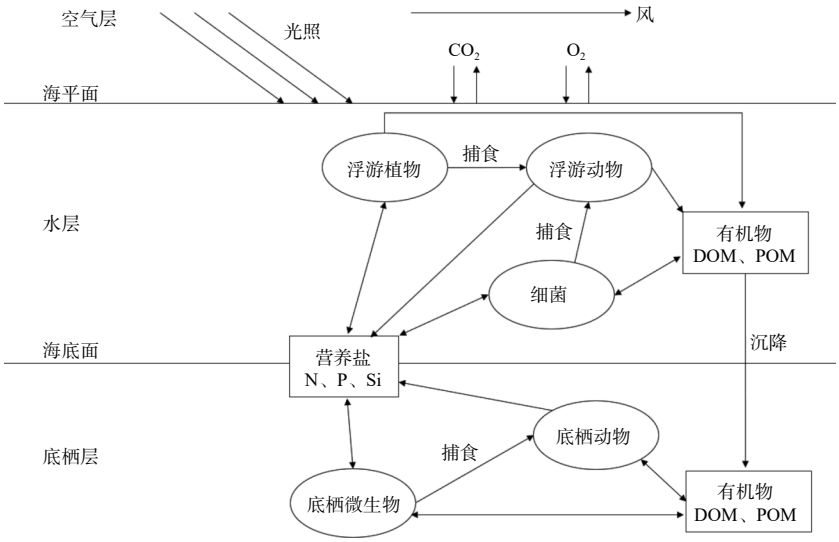


图 1 ERSEM 生态模型的结构

Fig. 1 Structural diagram of the ERSEM ecological model

型非线性响应特征(低温与高温抑制效应)[16-18],引入乘法交互作用(multiplicative interaction,MI)模型[19]。根据实际海域内浮游植物的生长特性,考虑温度响应公式并标定最适温度阈值及抑制参数,实现更加精确的温度响应模拟。

(3) 盐度胁迫效应:许铭本[20]通过实验研究揭示了盐度对北部湾球形棕囊藻的抑制作用,当盐度低于 25 时,其生长速率显著下降。为此,本研究在藻类生长方程中引入盐度抑制项以增强模型生物过程的真实性,具体做法是基于 Wu 等[21]关于浮游藻类盐度适应性的研究成果,引入 Monod 模型,模拟盐度对藻类生长的影响。

(4) 营养盐吸收:结合河口及近岸海域生态调查数据,修正浮游植物对氮、磷营养盐的吸收效率及最大生长速率等参数。

Q10 模型:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \left(q_{10}^{\frac{T-10}{10}} - q_{10}^{\frac{T-32}{3}} \right) \tag{10}$$

式中:μ表示生长速率;$\mu_{\max}$表示最大生长速率;T表示温度;q_{10}表示温度系数。

MI 模型:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \exp\left[-A \cdot \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{273} \right) \right] \cdot \exp\left(-B \cdot \left| T - T_{opt} \right|^4 \right) \tag{11}$$

式中:A、B 表示 MI 模型参数,A 调节模型曲线形状,B 调节最适温度范围[19];T_{opt} 代表浮游植物的最适温度。

Monod 模型盐度公式:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S} \tag{12}$$

式中:K_S 为盐度的半饱和系数;S 为盐度。

1.3 FABM 模型耦合连接器

FVCOM 水动力模型(基于 Fortran 开发)与 ERSEM 生态系统模型(采用 C++架构)存在异构模型架构差异,其时空离散方案及变量定义体系难以直接兼容,导致物理场与生物地球化学场的数据传递面临格式解析与尺度匹配双重挑战。因此,研究人员开发了 FABM(framework for aquatic biogeochemical models)耦合框架作为水动力−生态模型的数据桥梁系统。该框架采用中间件技术构建标准化数据交换协议,在不改变 FVCOM 与 ERSEM 源代码的前提下,通过动态链接库封装两模型的输入输出接口,利用内存映射技术实现流速、温度、盐度等物理量与营养盐、叶绿素 *a* 等生物化学变量的实时双向传输(见图 2)。具体而言,FVCOM 负责计算三维水动力场、悬浮泥沙浓度以及生态要素的输移,计算结果经 FABM 处理后输入 ERSEM 中,驱动生物地球化学过程的模拟。ERSEM 根据物理模型输入计算生物地球化学状态变量,包括各生化变量、生理特性变量和各物质硝化、反硝化等过程参数,同时将悬浮泥沙浓度、底床糙率变化等反

馈参数通过 FABM 逆向传递至 FVCOM，进行下一轮的水动力与物质输运计算。

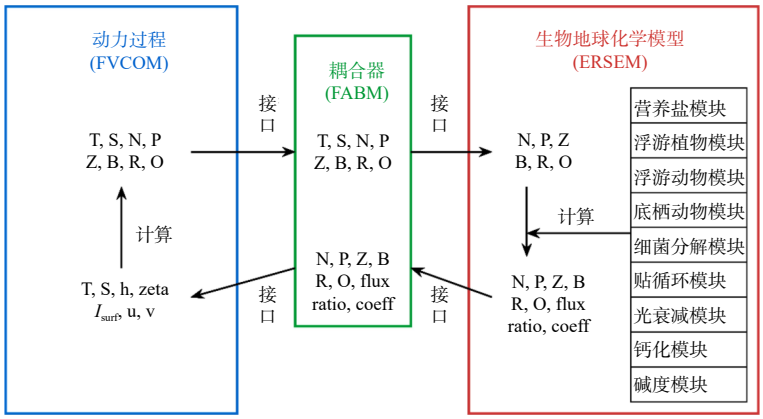


图 2　FVCOM-FABM-ERSEM 耦合过程

Fig. 2　Schematic diagram of FVCOM-FABM-ERSEM coupling

1.4　模型设置

本文使用嵌套网格技术平衡计算效率与精度需求，大区域网格范围涵盖了整个海南岛及其周边海域(105°E—112°E, 15°N—22°N)，如图 3(b)所示，其岸线数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的海岸线数据库(https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/)。小区域网格范围在琼州海峡内部，如图 3(c)所示，其精度更高的岸线数据是从美国陆地卫星 Landsat8 的遥感影像数据(https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/)中提取得到。大区域网格总数为 165941，最小的网格距离计算步长为 100 m，开边界处节点的最大距离为 10 km；小区域网格总数为 12064，最小的网格距离计算步长为 30 m。模型加密了海南岛北部岸线网格，把南渡江河流段边界设置在南渡江龙塘站，如图 3(c)所示，深海区水深数据采用的是全球地势模型 ETOPO 数据(https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/)，而雷州半岛附近、琼州海峡和海南岛北部海域的水深数据采用的是电子海图数据。

水动力模型开边界潮汐数据来源于全球潮汐模型 TPXO9(https://www.tpxo.net/global/)的潮汐调和分析结果；风、气温、蒸发降雨、热通量、大气压等外部强迫数据来源于欧洲中期天气预报中心 ERA5 数据集(http://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset)；海表高度、海流和温盐数据来源于哥白尼海事服务 CMEMS 的数据集(https://resources.marine.copernicus.eu)；径流量数据和含沙量数据来源于水利部中国河流泥沙公报(http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/)；波浪模块是由 SWAN 模型输出的波浪数据离线驱动。大区域模型水动力计算采用冷启动的方式，初始流场流速和潮位均设置为 0，潮流计算时间步长为 20 s。

由于 FVCOM-FABM-ERSEM 耦合模型的运行需要的算力更大，为了提高计算效率，基于小区域模型模拟研究海域的生态动力过程。其中，水动力输入由大区域模型的水动力输出插值到小区域网格边界得到；开边界生态要素输入是由世界海洋地图集 WOA 的叶绿素、溶解氧和营养盐等数据插值到边界得到；河流生态要素输入来源于海南省生态环境厅发布的水质自动监测周报(https://hnsthb.hainan.gov.cn/hjzl/hjzlxx/shjzl_51014/szzdjczb_51015/index_mo.html)的营养盐及溶解氧数据。小区域模型同样采用冷启动的方式运行生态模块的计算，然而生态模型的稳定需要较长的时间，所以本文将模型时间运行两年后的稳定结果作为后续模拟的初始场。

为了使生态模型能够准确反映出海南岛北部海域的生态群落特征，本文对生态模块中的光衰减和浮游植物等模块进行改进。首先，根据南渡江水环境调查报告中的泥沙调查结果，分析该流域的水体特征，包括浊度、泥沙各组分含量等，并与前人关于泥沙光衰减检验结果[22]进行

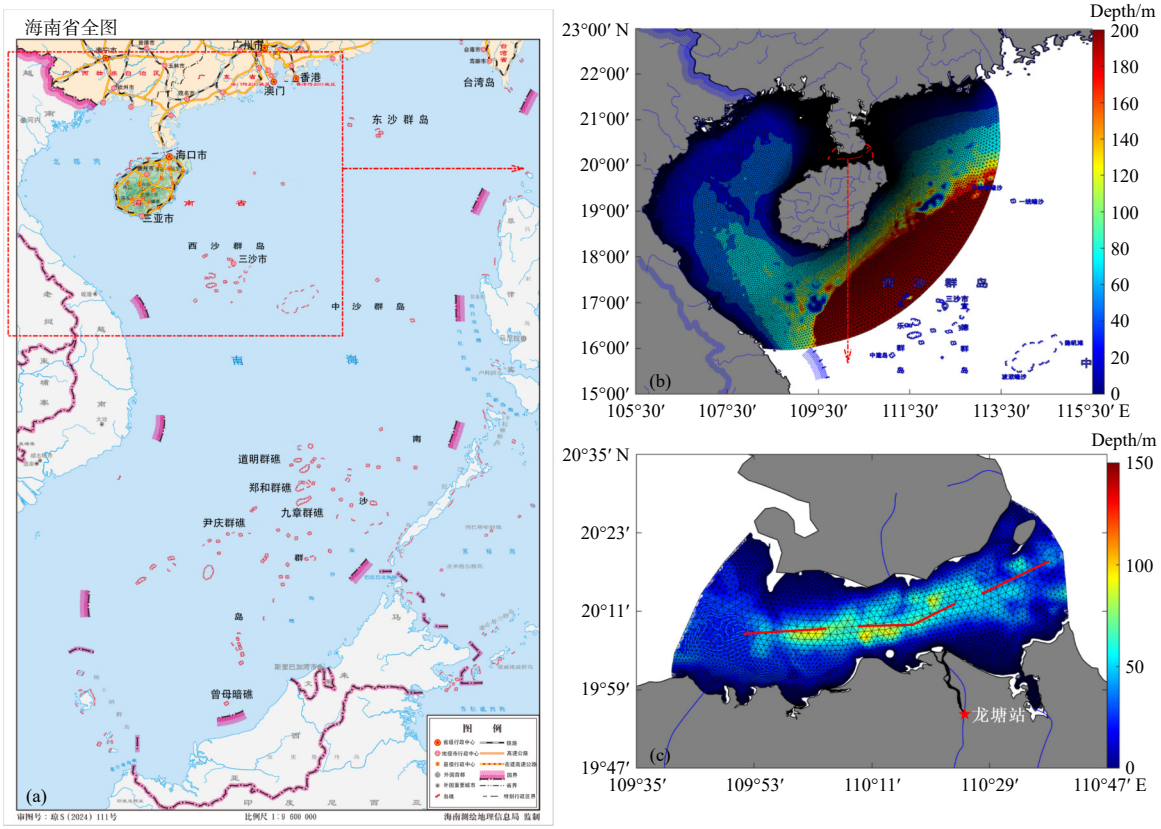


图 3 模型计算区域的网格和水深

Fig. 3 Grids and water depth of the model calculation area

对比，确定泥沙的吸收系数为 0.0004，后向散射系数为 0.0002。其次，根据海域的生态调查中浮游植物的实际情况，调整浮游植物的温度响应、盐度抑制效应。从海南岛附近海域球形棕囊藻的记录和研究结果来看，球形棕囊藻最适生长温度为 20 ℃，并能够在 16 ℃ ~ 28 ℃ 温度范围内生长增殖。因此，使用 MI 模型能够更好地模拟球形棕囊藻的温度响应，参考 THOMAS 关于藻类的水温敏感性实验结果[19]，模型参数 A 取 10，B 取 0.002，而其他浮游植物遵循 Q10 温度响应，温度系数取 2.0。各个浮游植物模块采用相同的盐度抑制项，采用南渡江水站历史自动监测水质数据对盐度抑制作用进行率定，最后得到盐度的半饱和系数为 20 PSU。最后，根据海域内各浮游植物的丰度和分布情况，调整了各浮游植物模块的最大生长速率和对磷、氮的吸收速率（见表 1）。综合来看，本文完整地对海洋生态系统中物理−生物地球化学过程进行了考虑，避免因简化子系统导致的反馈缺失。鉴于海洋生态系统的生化过程繁多且复杂，加入越多生化过程的考虑，模型对实际海洋生态系统的模拟结果就越精确。因此，在考虑 ERSEM 所有生化过程的基础上对关键模块进行改进，能够提升模型的区域适应性和模拟精度。本文目的是从赤潮发生过

表 1 各浮游植物模块关键生态参数设置

Tab.1 Key ecological parameter settings for each phytoplankton module

生态参数	硅藻	微藻	超微型浮游植物	中型浮游植物
最大生长速率/d^{-1}	2.0	2.5	1.675	1.125
硝酸盐亲和力/$m^3 \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$	0.005	0.006	0.004	0.002
铵盐亲和力/ $m^3 \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$	0.005	0.007	0.004	0.002
磷酸盐亲和力/ $m^3 \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$	0.006	0.006	0.004	0.002

程不同藻类的叶绿素、氮、磷和水温的变化角度出发，分析导致赤潮发生的关键环境因子，因此主要将浮游植物叶绿素、磷酸盐、铵盐、硝酸盐和水温作为关键参数开展模型研究。

2　结果与讨论

2.1　模型验证

2.1.1　水动力模型验证

为了评价模型的模拟精确性，本研究对建立的海南岛近岸海域水动力模型和生态动力模型进行了系统的验证，验证数据来源于海南岛近岸海域的潮流观测站、水质监测浮标和近岸海域及南渡江河口生态系统综合科学调查报告，具体的验证点位如图 4 所示。

为验证水动力模型可靠性，选取琼州海峡两个潮流观测站点在 2019 年 4 月 12 日 09:00 至 13 日 10:00 大潮期间的水动力过程进行模拟验证，结果如图 5 所示。潮位模拟结果与实测数据对比结果如图 5(a) ~ 图 5(b)所示，两者表现出很好的一致性，相位差小于 30 分钟，峰谷值均方根误差为 0.05 m。流速与流向验证结果如图 5(c) ~ 图 5(f)所示，模拟值和实测值随时间变化呈现出相似的曲线，流速、流向的模拟相关系数分别达到 0.65 和 0.75，最大误差控制在 0.2 m/s 和 90°以内，说明模型能够准确再现南海海域的潮汐动力特征。为了评估模型温盐场的模拟能力，针对海口湾监测站点 2019 年 3 月 31 日至 4 月 15 日的温盐动态开展模拟验证。图 6 显示，温盐模拟值与实测值的时间序列呈现出显著相关性(温度 R^2=0.80，盐度 R^2=0.71)，温度均方根误差为 0.62 ℃，盐度均方根误差为 0.67 PSU。模型不仅准确捕捉了温盐场的潮周期波动特征，其模拟曲线与实测值在数值量级和变化趋势上均高度契合，表明模型能够有效表征该海域温盐场的时空演变规律。

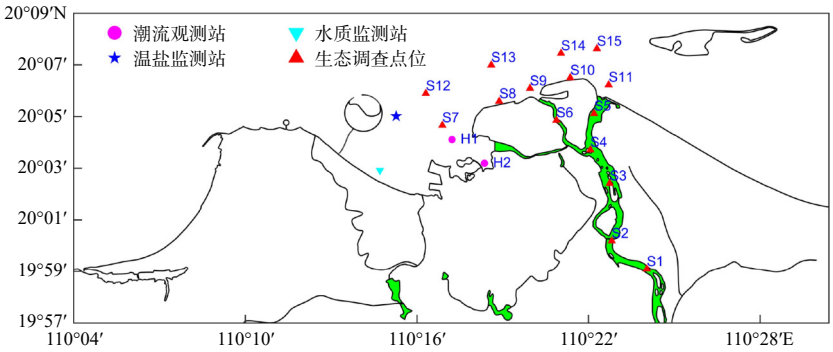


图 4　模型验证点位置

Fig. 4　Location of model validation sites

2.1.2　生态模型验证

基于海南省海洋监测预报中心 2022 年枯水期(5 月)与丰水期(9 月)开展的海南岛近岸海域及南渡江河口生态系统综合调查数据，结合同步浮标监测资料对生态模型进行验证。图 7 显示，南渡江河口叶绿素 *a* 及营养盐空间分布模拟结果与实测数据具有显著一致性，模型成功再现了河口区域生态要素的时空分异规律，验证了其对水环境季节性动态的模拟能力。误差分析结果表明，枯水期叶绿素、氮和磷的均方根误差分别为 0.105 mg/m^3、7.81 mmol/m^3 和 0.845 mmol/m^3，丰水期叶绿素、氮和磷的均方根误差分别为：0.054 mg/m^3、6.84 mmol/m^3 和 0.340 mmol/m^3。可以发现，枯水期的叶绿素和氮、磷的模拟误差较丰水期要大，原因分析如下：第一，河流流量输入与实际存在偏差，模型的河流流量输入是根据月均径流量插值得到的，丰水期的流量较为稳定，而枯水期的流量月内变化较大，导致模型在枯水期的河流边界输入相对误差更大，导致了较大的生态模拟偏差；第二，河流的营养盐输入点位单一，河流营养物质含量的变化不仅受到径流的影响，同时还受到沿岸污染排放的影响。由于

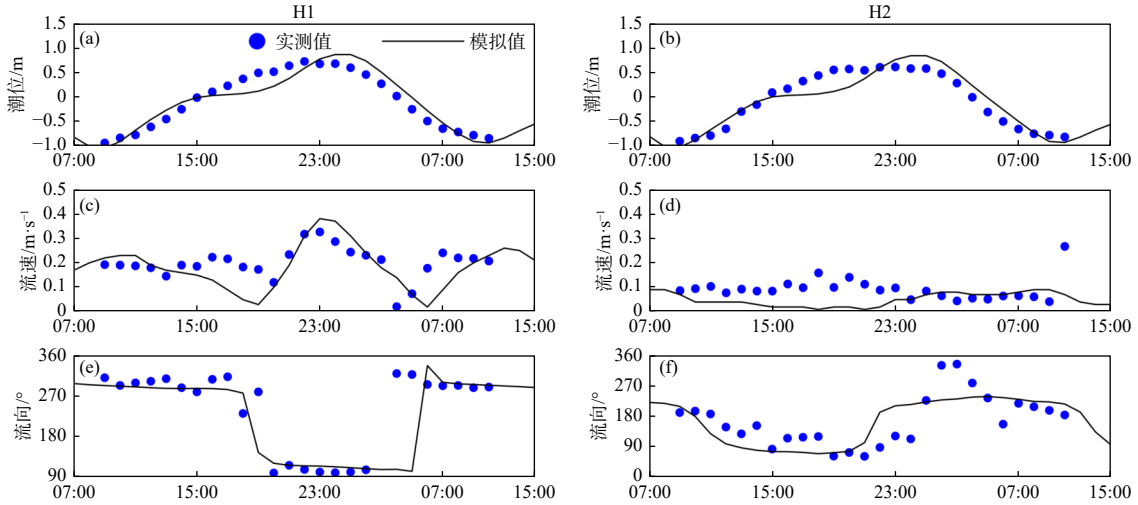


图 5 模型的潮位、流向和流速验证

Fig. 5 Verification of simulated tide level, direction and velocity

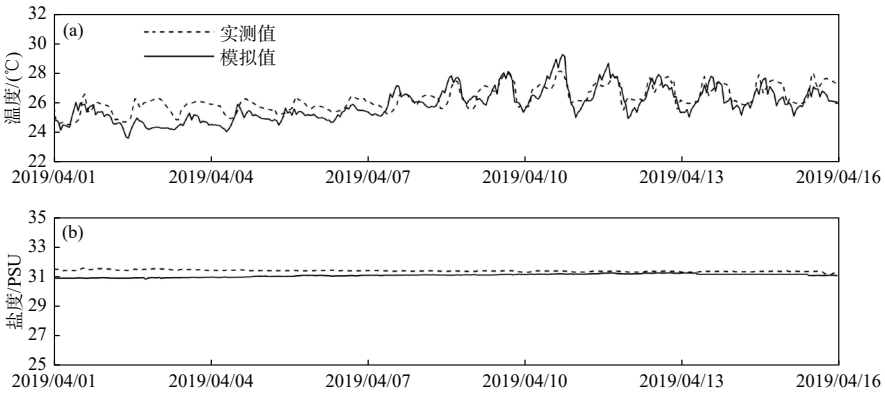


图 6 模型温盐验证

Fig. 6 Validation of simulated temperature and salinity

营养盐的沿岸排放形式多样，排放量难以统计，模型未考虑这部分营养物质的输入。在枯水期，营养物沿岸排放量占水体比例较丰水期要大，导致了较大的模拟误差。为了进一步验证模型在海湾中的模拟效果，提取了海口湾水质监测站点（位置为：110°16′ E，20°03′ N）2022 年叶绿素、氮盐和磷盐的历史数据对模型结果进行验证（见图 8）。结果表明，模型输出的生态要素浓度水平与实测数据具有良好的一致性，能够很好地模拟出海湾中叶绿素和营养盐的变化情况，其中叶绿素、氮盐和磷盐的均方根误差分别为 1.037 mg/m^3、0.758 mmol/m^3 和 0.174 mmol/m^3。

生态模型的验证结果表明，模型可精确表征海南北部海域生态要素的动态变化规律，能够准确模拟出富营养化敏感指标（叶绿素）和主要营养盐（氮、磷）的分布情况和阶段变化规律。因此，本文建立的基于 ERSEM 改进模型在反映海南特定的藻类生长与营养盐循环耦合机制方面具有显著优势。

2.2 海南岛冬春季赤潮发生过程模拟

2.2.1 球形棕囊藻特性

海南岛近岸海域赤潮事件呈现显著季节规律，高发期集中于每年 12 月至翌年 3 月（表层水温 16 ℃ ~ 22 ℃）。2000—2012 年，海南岛近岸共报道 20 多起赤潮灾害，赤潮优势种有叉角藻、球形棕囊藻和红海束毛藻等[2]，其中以球形棕囊藻为主要的赤潮藻类[23]。具体案例有：2014 年 2 月儋州洋浦近海因球形棕囊藻暴发引发赤潮，

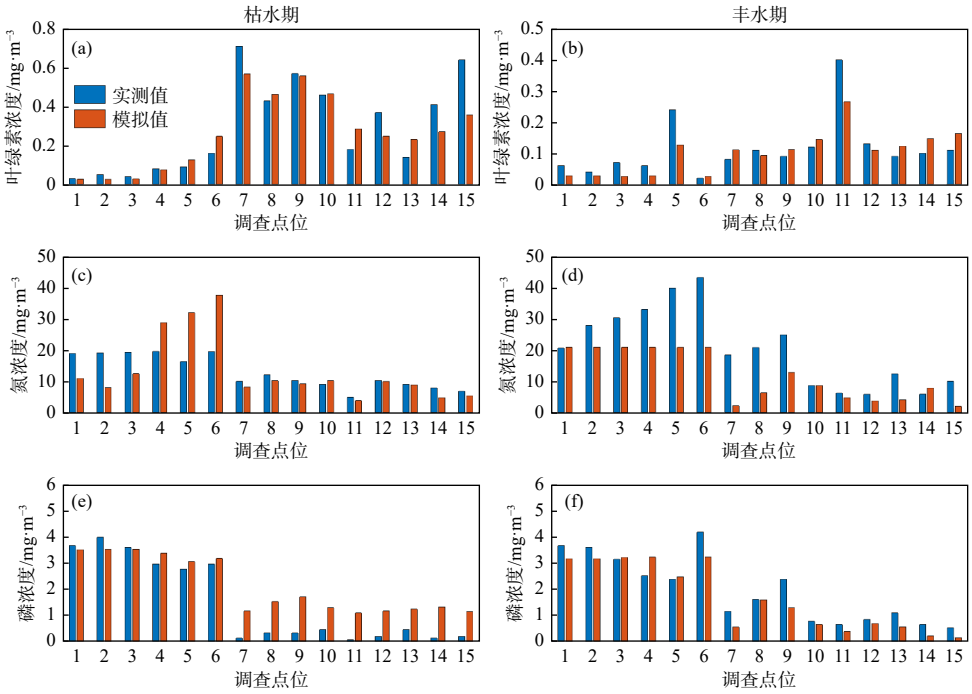


图 7　各调查点位叶绿素、氮和磷浓度验证

Fig. 7　Verification of chlorophyll, nitrogen and phosphorus concentrations at each survey site

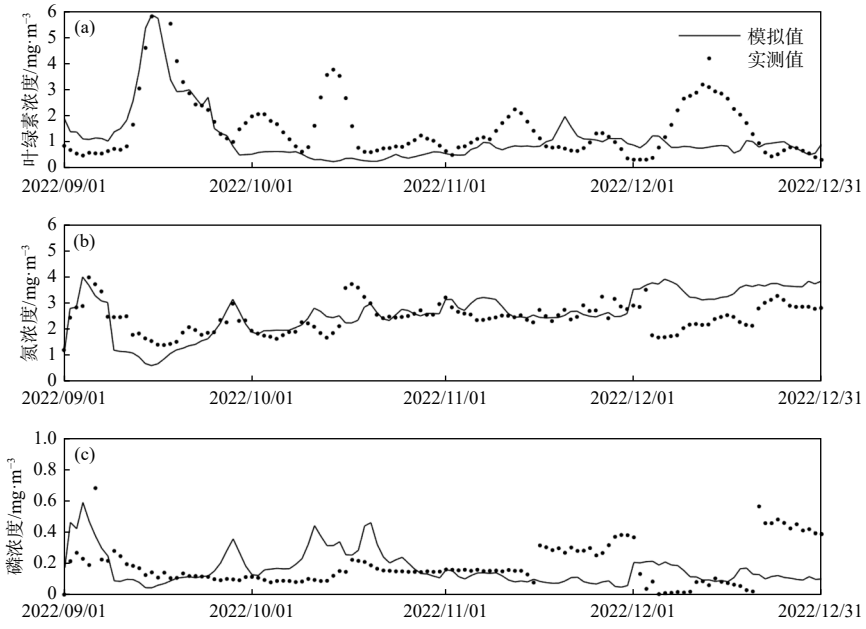


图 8　海口湾叶绿素、氮盐和磷盐随时间变化过程验证

Fig. 8　Verification of the temporal changes of chlorophyll, nitrogen and phosphate in Haikou Bay

导致鱼类与贝类大规模死亡[24]；2025 年 1 月海口湾出现球形棕囊藻赤潮，在水体表层出现大量黄褐色的囊状群体，其胶质囊体会堵塞鱼鳃致使鱼类窒息。本研究根据球形棕囊藻的生理特性优化了 ERSEM 模型浮游植物模块的微藻组分，包括盐度抑制、温度响应、营养盐吸收和光合作用等过程，然后开展球形棕囊藻赤潮发生过程研究，为海南岛近岸赤潮灾害的预警预报提供科学支撑。

球形棕囊藻主要分布于温带至热带海域，在

适宜的温度、营养盐浓度及水动力条件下可快速增殖形成赤潮，作为广温性赤潮物种，其最适生长温度存在显著地理差异。李波等的研究表明，北部湾种群的最适温度约为 20 ℃，因水文连通性，海南北部海域球形棕囊藻表现出与北部湾种群相似的温度响应特征。历史文献和海口湾生态浮标监测数据表明，海南北部海域球形棕囊藻赤潮发生主要受温度调控，大风过后的快速升温是其爆发性增殖的关键环境驱动因子[25]。

为了验证模型在赤潮过程的模拟精度，对海口湾赤潮过程（2024 年 12 月 28 日至 2025 年 1 月 9 日）进行数值模拟，并与浮标监测数据进行对比验证，得到日平均叶绿素随温度变化关系回归分析结果（见图 9）。当水温低于 20 ℃ 时，赤潮区域的叶绿素 *a* 浓度与温度呈现显著正相关，监测值与模拟值的回归方程斜率基本一致，说明模型中叶绿素随温度变化规律与实际生态过程相符。

2.2.2 赤潮发生成因分析

为了探究影响海南冬春季赤潮（球形棕囊藻）暴发的原因，截取了生态模型模拟赤潮期间的各生态要素输出结果，并将海水温度、磷浓度、氮浓度和硅藻叶绿素浓度与球形棕囊藻叶绿素浓度进行对比，结果如图 10 所示。结果表明，球形棕囊藻叶绿素与海水温度变化呈现较强的正相关，Spearman 秩相关系数为 0.709，显著性

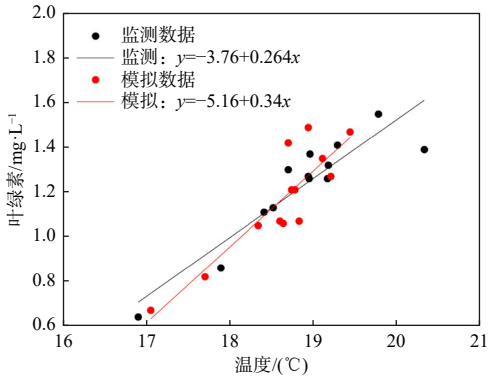


图 9 赤潮发生过程中叶绿素浓度随温度变化关系

Fig. 9 Chlorophyll concentration changes with temperature during red tide process

为 0.003（见表 2），表明水温升高是该藻增殖的重要驱动因子。在球形棕囊藻快速增殖之前，海口湾内的磷和氮的浓度处于一个较高的水平，是球形棕囊藻增殖的物质基础，然而当球形棕囊藻的快速增殖持续一段时间后，磷和氮的浓度均呈现“下降−小幅回升−继续下降”的三阶段特征：初期磷和氮被快速消耗导致浓度下降，随后与海口湾临近的南渡江营养盐的补给使浓度小幅回升，最终在球形棕囊藻的持续消耗下，浓度继续下降到更低的水平。由表 2 可知，磷浓度与球形棕囊藻叶绿素的相关系数为−0.631，显著性为 0.002，两者呈现负相关关系，说明磷可能是控制球形棕囊藻生长的关键营养物质。相较而言，氮浓度与球形棕囊藻叶绿素相关性不大，分析可能是因为

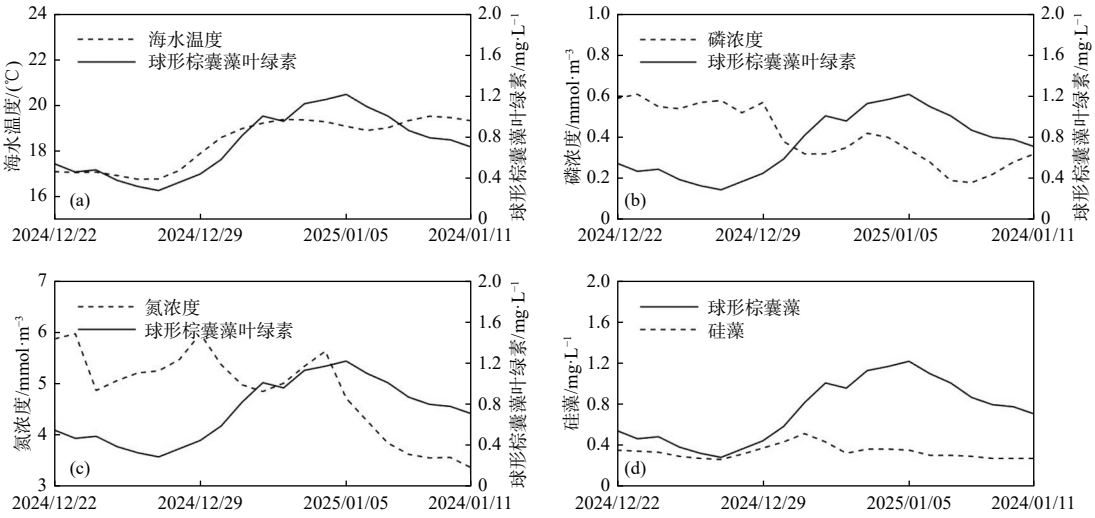


图 10 海水温度、磷浓度、氮浓度和硅藻对球形棕囊藻的影响

Fig. 10 Effects of sea temperature, phosphorus, nitrogen, and diatoms on *Phaeocystis globose*

海口湾内氮浓度充足，且南渡江河口氮补充较多，所以氮对球形棕囊藻的生长的抑制作用不太明显。整个模拟过程，硅藻都处于一个较低的水平，仅在海水温度骤升时段有小幅度的升高。这种受限的生长特征可能有两方面原因：其一，冬春季海水温度不高，没有达到硅藻的最适生长温度，硅藻生长较为缓慢；其二，球形棕囊藻通过资源竞争成为湾内的优势种，抢占了大部分的营养盐和短波辐射，硅藻的生长没有足够的营养盐支持，导致生长缓慢。模型结果很好地体现了球形棕囊藻和硅藻等其他浮游植物的种间竞争过程。

表 2　磷、氮和水温与球形棕囊藻叶绿素的相关性

Tab.2　Correlation between phosphorus, nitrogen, temperature and chlorophyll in *Phaeocystis globose*

	磷浓度	氮浓度	水温
Spearman秩相关系数	−0.631	−0.371	0.709
显著性（*P*值）	0.002	0.098	0.003

基于赤潮期间关键生态要素平均分布特征（见图 11），能够直观地分析该海域内赤潮易发生区域。图 11(c)~图 11(e)显示，海口湾作为赤潮核心发生区，其磷酸盐、氨氮和无机氮的来源主要为南渡江的输入，河口营养盐在时均呈现向西输运的特征，影响范围东至铺前湾，西至澄迈湾。图 11(f)海域温度分布场表明，铺前湾因半封闭地形限制水体交换导致热累积效应突出，湾内的平均水温较外海高 2.5 ℃。值得注意的是图 11(a)、图 11(b)，赤潮期间球形棕囊藻叶绿素

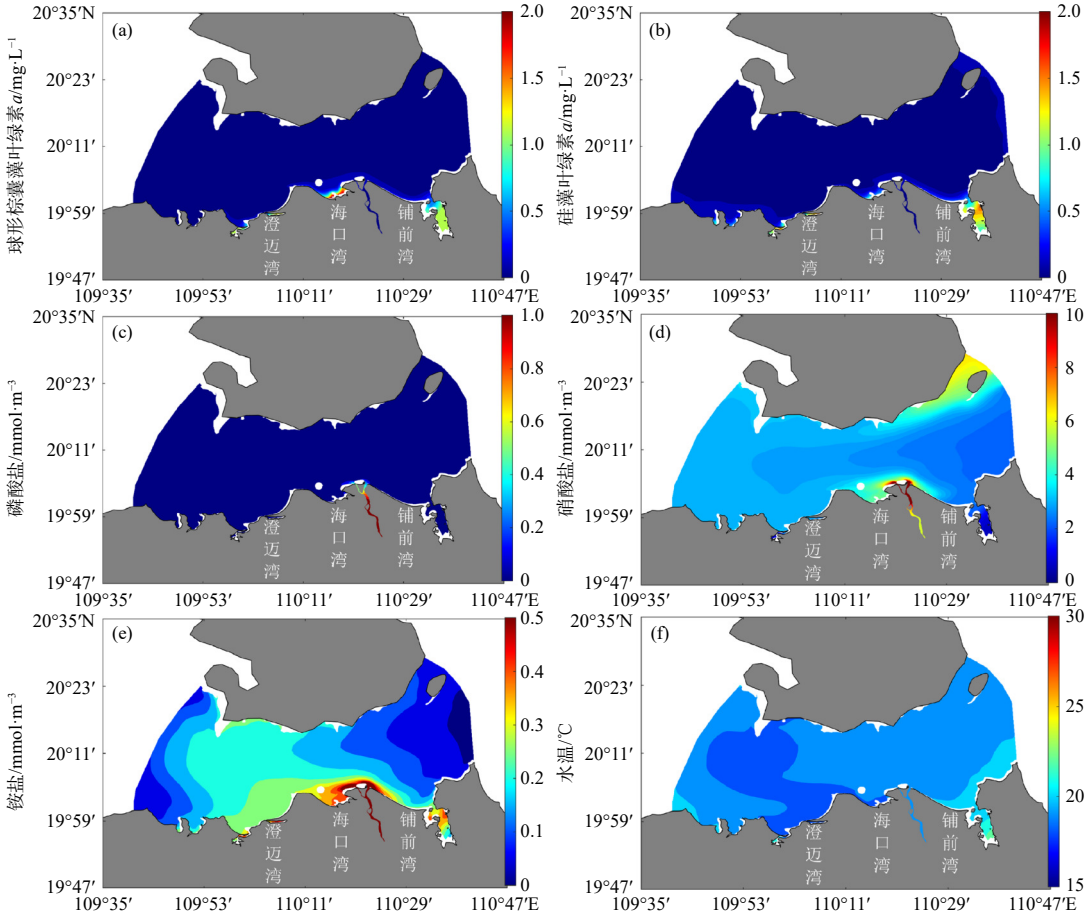


图 11　海南北部海域赤潮过程生态要素平均分布场

Fig. 11　Average distribution of ecological elements during red tide process in the northern waters of Hainan

高值区不仅存在于海口湾，在铺前湾也出现球形棕囊藻叶绿素浓度较高的现象。然而现场监测未记录铺前湾赤潮事件，可能的原因是：其一，铺前湾内陆源营养盐输入较少，若球形棕囊藻快速增殖，营养盐浓度会迅速降低，并触发营养盐限制效应，抑制其持续增殖；其二，铺前湾内适宜的环境条件使浮游植物群落呈现高多样性特征，浮游植物的丰度较高，与球形棕囊藻形成竞争平衡，阻止球形棕囊藻成为优势种并引发赤潮。

模型结果初步阐明了海口湾冬春季赤潮发生的多阶段驱动机制。

（1）营养盐积累阶段：由于南渡江流域营养盐的日均输入，冬季强风期的湍流混合加强和低温环境下浮游植物营养盐的低吸收效率等因素，海口湾内的营养盐水平维持在一个较高的水平，为球形棕囊藻赤潮的暴发提供了物质基础。

（2）球形棕囊藻赤潮触发阶段：强风期过后，气温上升导致表层水温升高，解除了球形棕囊藻的低温抑制，藻细胞迅速增殖并成为优势种，并通过快速消耗营养盐和抢占阳光扩大竞争优势。

（3）囊体形成阶段：当球形棕囊藻种群密度超过一定数值时，单细胞会聚合在一起相处群体并以囊体形态形成赤潮[20]。

3 结 论

（1）水动力模型精确再现潮位（*RMSE*=0.05 m）、流速流向（R^2≥0.65）及温盐分布（R^2≥0.71），能够反映出关注海域的水动力特性，为生态模型提供了可靠的物理场驱动。

（2）通过对 ERSEM 模型引入 MI 温度响应函数、泥沙光衰减及盐度抑制项优化后，构建的生态模型能准确模拟河海过渡带生态要素时空分布，生态要素随时间变化与监测数据表现出相似的规律，并揭示海南冬春季球形棕囊藻生长与水温呈强线性相关（*R*=0.709），证明了水温主导、营养盐积累及种间竞争抑制共同驱动赤潮暴发的机制。通过调整浮游植物的生长依赖参数，该模型可以应用到更加广泛的海域，为赤潮预警提供科学依据。

（3）本文建立的生态模型虽能较好地模拟赤潮发生过程，但模型仍然存在一定的局限性，比如未考虑球形棕囊藻双形态特征：游离单细胞趋光趋化行为缺失，囊体形态因体积增大导致的生物捕食率衰减机制未体现。后续研究工作会将藻类的主动运动行为加入模型中计算，并考虑藻类不同形态的生化过程变化。

参考文献：

[1] 刘贤词, 岳 平, 邢 巧, 等. 海南省南渡江流域生态环境调查与保护对策 [J]. 水利经济, 2014, 32(5): 46-49,73.

[2] 程 玲. 海南近岸海域冬春季浮游植物群落结构及赤潮生物种群研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2012: 10-21.

[3] 海南省生态环境厅. 2024 年第四季度海南省生态环境质量公报[EB/OL].(2025-01-27)[2025-03-05].https://hnsthb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202501/t20250127_3810003.html.

[4] NOGUEIRA E, BRAVO I, MONTERO P, et al. HABs in coastal upwelling systems: insights from an exceptional red tide of the toxigenic dinoflagellate *Alexandrium minutum*[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108790.

[5] ZHAO X, LIU R J, MA Y, et al. Red tide detection method for HY−1D Coastal Zone imager based on U−Net convolutional neural network[J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): 88.

[6] 弓 耘. 辽河口营养盐及浮游植物时空分布数值模拟研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2024: 13-40.

[7] SHIN J, KHIM B K, JANG L H, et al. Convolutional neural network model for discrimination of harmful algal bloom (HAB) from non-HABs using Sentinel-3 OLCI imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 191: 250-262.

[8] SHEE A, SIL S, DEOGHARIA R. Three-dimensional characteristics of mesoscale eddies in the western boundary current region of the Bay of Bengal using ROMS-NPZD[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2024, 105: 101424.

[9] 郭 琳. 加利福尼亚流系物理−生态过程的时空演变特征及其动力学机制研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 53-78.

[10] AKBARINIA H, EZAM M, GHAVAM MOSTAFAVI P. Three-dimensional simulation of seasonal variations of the biogeochemical parameters in the Persian gulf using an NPZD Model[J]. Hydrophysics, 2021, 6(2): 53-70.

[11] 施沈阳, 葛建忠, 陈建忠, 等. 基于 FVCOM 的物理−生物地球化学耦合模型构建与应用 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2020(3): 55-67.

[12] DOUGAN K E, DENG Z L, WÖHLBRAND L, et al. Multi-omics analysis reveals the molecular response to heat stress in a “red tide” dinoflagellate[J]. Genome Biology, 2023, 24(1): 265.

（下转第 663 页）