

# 我国海上能源岛三级联动保障体系构建与 制度创新研究

陈亚洲<sup>1,2</sup>, 朱琳<sup>3,4</sup>, 徐静<sup>3,4</sup>, 付强<sup>3,4</sup>, 周守为<sup>5</sup>, 王国荣<sup>1,2\*</sup>, 钟林<sup>1,2</sup>, 唐洋<sup>1,2</sup>, 董学成<sup>6</sup>

(1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500; 2. 西南石油大学能源装备研究院, 成都 610500; 3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 4. 海洋天然气水合物全国重点实验室, 北京 100028; 5. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100027; 6. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 在“双碳”目标与深远海能源开发战略推动下, 南海能源岛群正由单一能源供给节点向集多能耦合、能源转化、运行保障、应急响应和远距离补给于一体的综合性工程平台演进。受离岸距离远、海况复杂、补给链条长和多主体协同不足等因素制约, 现有以近岸母港为主的保障模式难以支撑南海深远海能源岛群规模化、连续化运行。本文系统梳理国内外能源岛与海上能源枢纽的运行保障模式, 分析南海港口、岛礁节点和前沿设施的能力基础及短板, 提出“核心母港-中继枢纽-前沿支点”三级联动保障体系。该体系依据保障距离、水深条件、任务属性和响应时效, 将南海能源岛群运行保障空间划分为近海支撑层、远海中继层和深远海前沿层, 并分别配置综合调度、接力转换和近域响应功能。典型任务情景测算表明, 三级联动模式可将急需备件补给响应时间由约 51.5 h 缩短至约 17.5 h, 降幅约为 66.0%; 将人员医疗救援到达时间由约 3.28 h 缩短至约 1.43 h, 降幅约为 56.4%。在制度层面, 建议以“南海深蓝经济综合试验区”为综合协调平台, 协同推进“标准海”用海单元认证、海域立体分层设权、飞地经济合作和海空应急协同保障机制。研究表明, 三级联动保障体系有助于提升南海深远海能源岛群运行效率、应急响应能力和系统韧性, 可为我国深远海能源工程保障体系建设提供参考。

**关键词:** 海上能源岛; 三级联动保障体系; 运行保障; 空间治理; 制度创新

**中图分类号:** F426.61 **文献标识码:** A

## Construction of Three-Tier Coordinated Support System and Institutional Innovation for Offshore Energy Islands in China

Chen Yazhou<sup>1,2</sup>, Zhu Lin<sup>3,4</sup>, Xu Jing<sup>3,4</sup>, Fu Qiang<sup>3,4</sup>, Zhou Shouwei<sup>5</sup>, Wang Guorong<sup>1,2\*</sup>,  
Zhong Lin<sup>1,2</sup>, Tang Yang<sup>1,2</sup>, Dong Xuecheng<sup>6</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Energy Equipment Research Institute, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 4. State Key Laboratory of Offshore Natural Gas Hydrates, Beijing 100028, China; 5. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China; 6. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Driven by China's carbon peaking and carbon neutralization goals as well as the strategic development of deep-offshore

收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-05-01

通讯作者: \*王国荣, 西南石油大学能源装备研究院教授, 研究方向为油气装备开发及能源综合利用; E-mail: wanggr@swpu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“深远海能源开发与生态环境保护战略研究”(25HNZX-04), “海上能源一体化协同开发战略研究”(2025-HZ-30)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

energy resources, energy island clusters in the South China Sea are evolving from single energy-supply nodes into integrated engineering platforms that combine multi-energy coupling, energy conversion, operational support, emergency response, and long-distance replenishment. However, the existing support model dominated by nearshore home ports is constrained by long offshore distances, complex sea conditions, extended replenishment chains, and insufficient multi-stakeholder coordination, making it difficult to support large-scale and continuous operation of deep-offshore energy island clusters. This study reviews operational support models for energy islands and offshore energy hubs in China and abroad, analyzes the capability basis and limitations of ports, island-reef nodes, and frontier facilities in the South China Sea, and proposes a three-tier coordinated support system consisting of core home ports, relay hubs, and frontier support nodes. Based on support distance, water depth, task attributes, and response requirements, the proposed system divides the support space into a nearshore support layer, an offshore relay layer, and a deep-offshore frontier layer, corresponding respectively to integrated coordination, relay transfer, and near-field response functions. Scenario-based calculations indicate that the proposed system can reduce the response time for urgent spare-parts replenishment from approximately 51.5 h to 17.5 h, a decrease of about 66%, and reduce the arrival time for medical rescue from approximately 3.28 h to 1.43 h, a decrease of about 56.4%. Institutionally, this study recommends establishing the South China Sea Deep Blue Economic Comprehensive Pilot Zone as a coordination platform, while advancing standard sea-unit certification, three-dimensional layered sea-use rights, enclave-economy cooperation, and sea-air emergency coordination mechanisms. The results indicate that the three-tier coordinated support system can improve the operational efficiency, emergency response capability, and system resilience of energy island clusters in the South China Sea, providing a reference for the construction of deep-offshore energy engineering support systems in China.

**Keywords:** offshore energy island; three-tier coordinated support system; operation support; spatial governance; institutional innovation

### 一、前言

南海是我国面积最大、深水海域占比超过70%的重要海域，蕴藏丰富的油气资源和多类型海洋可再生能源，是保障国家能源安全、推进海洋强国建设和服务“双碳”目标的重要战略空间<sup>[1-10]</sup>。随着南海能源开发由近岸向深远海延伸，资源分布离岸化、作业环境复杂化与传统近岸基地保障模式之间的矛盾日益突出。保障半径大、补给链条长、响应效率低和多主体协同不足，已成为制约南海深远海能源岛群规模化、连续化运行的关键瓶颈。

能源岛是深远海能源开发的重要工程组织形态，可集成能源生产、储存、转换、物资补给、设备运维、应急救援和通信服务等功能，为远海油气设施、海上新能源工程和前沿驻留节点提供持续支撑<sup>[11]</sup>。然而，在南海深远海场景下，能源岛长期运行仍面临复杂海况、高盐雾腐蚀、设备维护难度大、物资补给周期长和应急救援成本高等问题。现有保障节点虽具备一定基础设施条件，但总体上仍存在空间布局分散、功能层级不清、资源配置不足和跨节点联动机制薄弱等短板，难以满足多能源岛群并行运行和突发事件快速响应需求。

针对上述问题，本文系统梳理国内外能源岛与海上能源枢纽运行保障模式，结合南海港口、岛礁节点和前沿设施基础，分析我国深远海能源岛运行保障体系在空间布局、功能配置、协同机制和制度

供给方面的不足。在此基础上，提出“核心母港—中继枢纽—前沿支点”三级联动保障体系，并从工程节点布局、功能边界划分、极端场景韧性、典型任务效率测算和制度创新支撑等方面论证其实施路径。本文旨在将能源岛研究由能源生产与外送拓展至运行保障体系构建，为我国南海深远海能源工程长期稳定运行和保障体系建设提供参考。

### 二、国内外能源岛运行保障模式与经验

国际实践表明，能源岛功能正由单一电力汇集节点向综合能源枢纽和运行保障平台演进。其运行保障模式主要包括三类：一是依托海上变电站、直流输电和跨区互联，承担深远海风电及多能互补系统的能源汇集与外送；二是通过海上制氢、储能和合成燃料等方式，承担多能耦合与能源转换；三是在远海能源设施集群近域部署补给、检修、救援、医疗和通信能力，形成前置化运维与应急保障节点。随着海洋能源开发向远岸、深水和多能融合方向发展，单一近岸母港保障模式已难以满足连续运行需求，分层化、平台化、网络化保障体系逐渐成为重要趋势。

#### （一）国外能源岛保障模式发展及特征

##### 1. 理论架构与技术经济逻辑

国际前沿研究从经济距离、能源载体与服务边

界等维度,为深远海能源岛建设提供了理论支撑。研究人员<sup>[12]</sup>针对丹麦北海能源枢纽的研究指出,350 km可作为“电子传输”与“分子传输”的重要经济性临界距离:在距岸350 km以内,高压直流输电结合岸上制氢具有成本优势;超过350 km后,海上制氢、管道输氢或能源到X (Power-to-X) 液体燃料外送更具经济性和系统韧性。

Rettig等研究人员<sup>[13]</sup>提出能源岛“三维边界”理论,认为能源岛兼具“物理岛”和“服务岛”双重属性。前者强调岛礁、人工岛或海上平台等实体空间载体,后者强调由能源供给、运维补给、应急救援和信息服务构成的功能辐射网络。欧洲太阳风-磁层相互作用全景成像卫星计划(SMILE)项目进一步表明,海岛能源系统具有弱互联、高波动和运行边界特殊等特征,通用能源政策难以完全适配,需通过电价机制、计量标准和市场准入等制度创新实现技术场景与政策规则匹配<sup>[14]</sup>。

## 2. 工程实践与运营模式

从工程实践看,丹麦北海能源岛、比利时“伊丽莎白公主”能源岛和荷兰海上平台复用模式具有代表性。丹麦北海能源岛在规划阶段即被定位为海上风电集群的综合运维与应急基地,配置工作港、仓储与备件中心、维修车间、住宿设施、直升机起降点及急救消防模块,其核心是通过运维资源前置降低对近岸母港的依赖<sup>[15-17]</sup>。比利时“伊丽莎白公主”能源岛虽以海上电网枢纽为主,但同步嵌入工作港、直升机平台和救援设施,体现了“电网枢纽+港口保障+航空通道”的复合化趋势<sup>[18-20]</sup>。荷兰等国家则通过改造既有海上平台,将其转化为能源或综合保障节点,并依托岸基服务港、专业运维船舶和共享信息平台开展全生命周期管理<sup>[21,22]</sup>。

## 3. 局限及风险教训

国际经验并非均呈线性成功演进。既有研究表明,能源岛或岛屿型能源系统虽有助于提升能源自给能力和远海资源利用效率,但其落地高度依赖技术经济条件、制度适配、运维组织、空间治理和社会接受度。若仅强调海上枢纽建设和运维资源前置,容易低估建设风险和运行不确定性。

从自然岛屿能源转型看,研究人员<sup>[23]</sup>指出,克里特岛能源自给不仅取决于技术可行性,还受国家能源政策、地方治理能力、市场主体动力和经济工具制约。Praene等<sup>[24]</sup>对留尼汪岛的研究也表明,岛

屿能源转型可能受人口增长、能源需求上升、土地资源紧张、可再生能源成本竞争力不足和电网基础设施不完善等因素影响。

从漂浮式能源岛建设看,能源岛选址需综合考虑军事训练区、航运密集区、港口机动水域、通信电缆、生态保护区、水深条件、离岸距离和可视性影响<sup>[25]</sup>。英国Norfolk Boreas项目和挪威Utsira Nord浮式风电项目进一步表明,远海能源工程易受供应链、利率、补贴机制和风险分担模式影响。2023年,相关研究报告指出<sup>[26]</sup>,受通胀、资本成本和供应链压力影响,海上风电行业成本上升最高达40%,相关部门停止推进Norfolk Boreas项目开发,并计提相关减值和准备金。

综合归纳典型案例(见表1),南海能源岛群保障体系不能简单复制欧洲模式,而应结合我国南海空间尺度、岛礁基础、海洋权益管理和工程保障需求,构建具有分层接续、冗余支撑和制度适配能力的本土化保障体系。

## (二) 国内能源岛保障模式发展及特征

### 1. 政策支持与技术经济逻辑

随着海上风电规模化发展和深远海能源开发潜力释放,我国正加快推进海上能源岛的相关政策与技术布局。从国家层面提出“统一规划、统一送出”模式,支持海上综合能源岛等前沿技术示范,鼓励在海上风电场区集约化布局多种能源利用资源<sup>[27-29]</sup>。在地方层面,江苏推进深远海风电试点示范和海上能源岛建设,广东启动海上综合能源岛产业科技创新平台,海南持续推进清洁能源岛建设,相关政策共同推动海上能源岛由概念研究进入示范探索阶段<sup>[11-30]</sup>。

在能源外送路径方面,国内研究已对深远海风电能源岛的经济性开展测算。相关研究表明<sup>[29]</sup>,在离岸100~200 km范围内,柔性直流输电仍具有较强的经济性;随着电解制氢技术的进步,电力-氢能混合外送模式将在中长期具备竞争力。在2050年情景下,离岸约200 km的电力-氢能混合外送单位能量成本有望降至0.18~0.27元/(kW·h),为能源岛由电力外送节点向绿色分子枢纽转型提供依据。

### 2. 工程实践与运营模式

我国海上能源岛实践总体处于技术验证和示范应用阶段,呈现多能互补、功能融合和平台化探索

趋势。江苏依托连云港、盐城、南通等地的资源条件开展海上能源岛选址研究，并推进如东太阳沙海域综合能源岛开发<sup>[27-31]</sup>；广东启动国内首个海上综合能源岛产业创新平台，面向海上制氢、液氨、甲醇等关键技术开展示范验证<sup>[30]</sup>。

在运行保障方面，我国尚未形成专门面向海上能源岛的完整保障体系，但依托海洋油气和海上风电

产业，已具备一定的区域性支撑能力。以广东省为例，湛江油气后勤服务基地、深圳赤湾石油后勤基地和中海油惠州物流基地构成南海油气保障基础，阳江、深圳和汕头等海上风电运维母港则支撑新能源运维体系建设。这些基地具备作业码头、专用仓储、通信导航、应急救援、运维船队和监测数据中心等条件，如表2所示。

表1 国际能源岛运行保障模式比较与启示

| 保障模式       | 代表案例                      | 核心设施配置   | 主要优势                        | 局限与风险                                   |
|------------|---------------------------|--|-----------------------------|---|
| 人工岛综合保障模式  | 丹麦北海能源岛<br>比利时“伊丽莎白公主”能源岛 | 工作港<br>备件仓储<br>维修车间<br>住宿设施<br>直升机平台<br>急救消防模块 | 可集成能源外送、运维补给、人员换班和应急救援功能    | 建设投资大、施工周期长，受海况、接口协调、安全管控和全生命周期运维成本影响明显 |
| 既有平台复用保障模式 | 荷兰等海上平台复用实践               | 既有海上平台<br>岸基服务港<br>运维船舶<br>共享信息平台              | 可降低新建成本，便于开展中继保障、状态监测和运维调度  | 受平台寿命、结构承载能力、改造空间和安全规范限制                |
| 自然岛屿型能源系统  | 克里特岛<br>留尼汪岛              | 分布式能源<br>储能系统<br>局域电网<br>公共服务设施                | 依托既有岛屿空间和公共设施，具备能源自给和人员驻留基础 | 受土地资源、电网基础、地方治理、市场机制和政策适配制约             |
| 漂浮式能源岛探索模式 | 克里特岛漂浮式能源岛<br>Utsira Nord | 漂浮式基础<br>锚泊系统<br>能源转换设施<br>运维支撑单元              | 适用于远岸深水海域，可突破固定式基础水深限制      | 成本、供应链、补贴机制、空间避让和风险分担不确定性较高             |

表2 广东省五大能源后勤保障基地现状与保障能力

| 基地名称       | 核心基础设施与专业配套硬件   | 典型最远服务对象     | 有效保障距离  |
|------------|---|--------------|---------|
| 湛江油气后勤服务基地 | 万吨级深水专用泊位群<br>深水钻完井物资智能仓储与保税中心<br>海空联运与海上应急救援指挥   | 陵水17-2气田     | 约400 km |
| 深圳赤湾石油后勤基地 | 深水半潜式平台靠泊能力<br>认证经营者高级认证物流园<br>数字化管材堆场  | 荔湾3-1深水气田    | 约320 km |
| 中海油惠州物流基地  | 无人遥控潜水器维修与油服产业链廊终端<br>高危化学品安防与溢油应急<br>大型导管架滑道   | 流花11-1/4-1油田 | 约200 km |
| 阳江海上风电运维基地 | 运维母船与交通船专用泊位<br>海上风电大数据采集与监视控制系统远程集控中心<br>大部件恒温存储库与台风避险锚地                                 | 阳江帆石海上风电场    | 约60 km  |
| 汕头海上风电运维基地 | 20兆瓦级大型机组运输的重件滚装码头<br>临海风电主轴承 / 叶片40兆瓦级六自由度动态测试实验室<br>24兆瓦级整机并网测试机位<br>“四个一体化”海上风电装备制造产业园 | 汕头勒门风电场      | 约20 km  |

### （三）国内外差距与关键启示

综合国内外实践可知，深远海能源岛运行保障体系并非单一港口、岛礁或平台设施建设问题，而是涵盖能源运维、海上物流、空间治理和应急协同的复合系统。随着海上能源、航运、渔业、生态保护和海底管廊等多类用海活动叠加，传统单项目审批和分部门管理模式难以有效应对空间冲突、累积影响和长期开发的不确定性。海洋空间规划可通过三维海域空间的统筹配置与动态调整，提高多功能用海兼容性和空间利用可预期性<sup>[32]</sup>。同时，远海能源设施运维研究表明，离岸距离增加将显著提高运维成本、人员安全风险和设备可靠性要求，状态监测、预测性维护、数字孪生和智能化调度已成为提升远海能源系统可用度的重要手段<sup>[33]</sup>。

深远海能源岛运行保障体系应同时满足物资补给、快速救援、前沿医疗、应急处置和装备试验运维等功能需求，如表3所示。与此相比，我国南海深远海能源开发仍存在三方面短板：一是空间治理统筹不足，多功能用海协调、航道渔业避让、海底电缆布局和立体开发管理仍不完善；二是技术经济压力较大，深远海施工、运维和应急成本较高，对关键装备可靠性、结构耐久性和远程维护能力提出更高要求；三是保障体系尚不健全，现有远海节点仍以物理设施建设为主，关键备件前置、维修资源缓存、医疗后送、跨节点应急联动和运行数据接入能力不足。

由此，南海能源岛群运行保障体系建设应突出三项原则：一是前置化与枢纽化，推动补给、运维、救援和医疗能力由岸基母港适度向远海节点前移；二是模块化与标准化，通过模块化设施、标准化流程和统一接口降低节点衔接成本；三是数据化与全生命周期管理，依托共享数据平台集成设备状态、运维计划、应急资源和预测性维护信息，提升运行效率与系统韧性。上述原则构成“核心母港-中继

枢纽-前沿支点”三级联动保障体系的重要基础。

## 三、海上能源岛三级联动保障体系战略设计

### （一）能源岛概念界定与研究逻辑框架

能源岛不宜仅理解为单一地理实体或能源外送平台，而应界定为兼具实体承载和服务辐射功能的复合型工程平台。结合能源岛“三维边界”理论<sup>[13]</sup>及南海深远海开发需求，本文将能源岛界定为：以自然岛礁、人工岛、海上平台或长期驻留设施为实体载体，集多能耦合、能源转化、物资补给、设备运维、应急救援、通信中继和数据服务等功能于一体，并能够对周边海域能源设施形成持续支撑能力的综合性工程系统。

从功能内涵看，能源岛包括两个层面：一是“物理岛”属性，即依托明确空间载体承载能源生产、储存、转换、补给、检修和应急设施；二是“服务岛”属性，即通过能源供给、运行保障、通信支撑、医疗后送和应急响应等能力，对周边海域形成动态服务边界。该边界并非固定的地理边界，而是由服务半径、航线可达性、响应时间、资源调度能力和服务对象分布共同决定。

为统一“近海、远海、深远海”空间用语，本文不将其简单等同于领海、专属经济区或大陆架等法律边界，而是将其作为运行保障体系的工程分层标准。依据保障距离、水深条件、通达方式和节点功能，本文提出南海能源岛群运行保障空间分层标准，如表4所示。

基于上述划分，南海深远海能源岛群并非若干孤立岛屿或单个平台的简单组合，而是由近海核心母港、远海中继节点、深远海前沿节点及其服务海域共同构成的网络化运行保障系统。三类节点通过物流流、人员流、信息流和应急响应流实现协同运行。

表3 能源岛运行保障体系功能配置需求

| 功能模块    | 关键配置                     | 保障目标             |
|---------|--------------------------|------------------|
| 物资补给与运输 | 钻完井物资、风电大部件、冷链物流、水电燃料补给  | 支撑连续运行与多类型物资周转   |
| 快速救援与转运 | 搜救直升机、高速救助船、应急通信系统       | 缩短事故响应与人员转运时间    |
| 前沿医疗保障  | 高压氧、创伤急救、远程会诊、医疗后送       | 提升远海人员生命安全保障能力   |
| 应急事件处置  | 避风泊位、溢油应急设备、防灾减灾设施       | 提高台风、溢油和突发故障处置能力 |
| 装备试验与运维 | 系泊试验场、动态测试平台、腐蚀暴露设施、备件仓储 | 支撑实海况验证与预测性维护    |

本文采用“物理节点-服务网络”相结合的研究框架，首先，识别南海近海、远海和深远海节点的基础条件；其次，根据任务复杂度、保障频次、响应时效和资源规模，构建“核心母港-中继枢纽-前沿支点”三级联动体系；最后，从综合试验区、海域立体分层设权、“标准海”认证、飞地经济协作和海空应急协同等方面提出制度支撑路径。本文研究逻辑框架图如图1所示。

(二) 南海岛群基础设施布局现状

在上述概念界定和空间分层的基础上，南海能源岛群运行保障可理解为跨空间层级、跨工程类型

和跨管理主体的系统组织问题。当前主要矛盾并非完全缺少保障节点，而是既有节点之间缺乏分层协同，导致物资补给、设备运维、人员轮换和应急救援过度依赖海南本岛等岸基节点，难以适应能源岛群规模化、连续化的运行需求。

近海支撑层是资源集聚度最高、岸基保障能力最强的层级。海南本岛拥有以“四方五港”为代表的港口体系，具备深水泊位、油气储备、物资集散、深海科研试验和能源物资分拨能力<sup>[34,35]</sup>。其中，洋浦港可支撑大型油气储备与深水泊位功能；三亚南山港可服务深海科研试验与能源物资分拨；三亚崖州湾科技城集聚深海科研机构 and 装备制造企业，

表4 南海能源岛群运行保障空间分层标准

| 空间层级 | 距核心母港距离  | 水深与环境特征                               | 代表性节点              | 保障特征                 | 对应保障层级 |
|------|--|---------------------------------------|--------------------|----------------------|--------|
| 近海   | ≤108 n mile<br>(≤200 km)                                   | 陆架浅水或中浅水海域<br>一般小于 200 m              | 海南本岛港口群、<br>近岸能源基地 | 岸基集聚<br>常态补给<br>综合调度 | 核心母港   |
| 远海   | 108~324 n mile<br>(200~600 km)                             | 陆架外缘、<br>岛礁周边或过渡性深水海域为<br>200~1000 m  | 西沙永兴岛等远海节点         | 中程接续<br>物资缓存<br>医疗中转 | 中继枢纽   |
| 深远海  | >324 n mile<br>(>600 km)<br>(重点节点>486 n mile,<br>即>900 km) | 深水、超深水或岛礁-深海盆地<br>复合环境<br>一般大于 1000 m | 南沙及更远深远海前沿节点       | 前置补给<br>近域救援<br>现场抢修 | 前沿支点   |

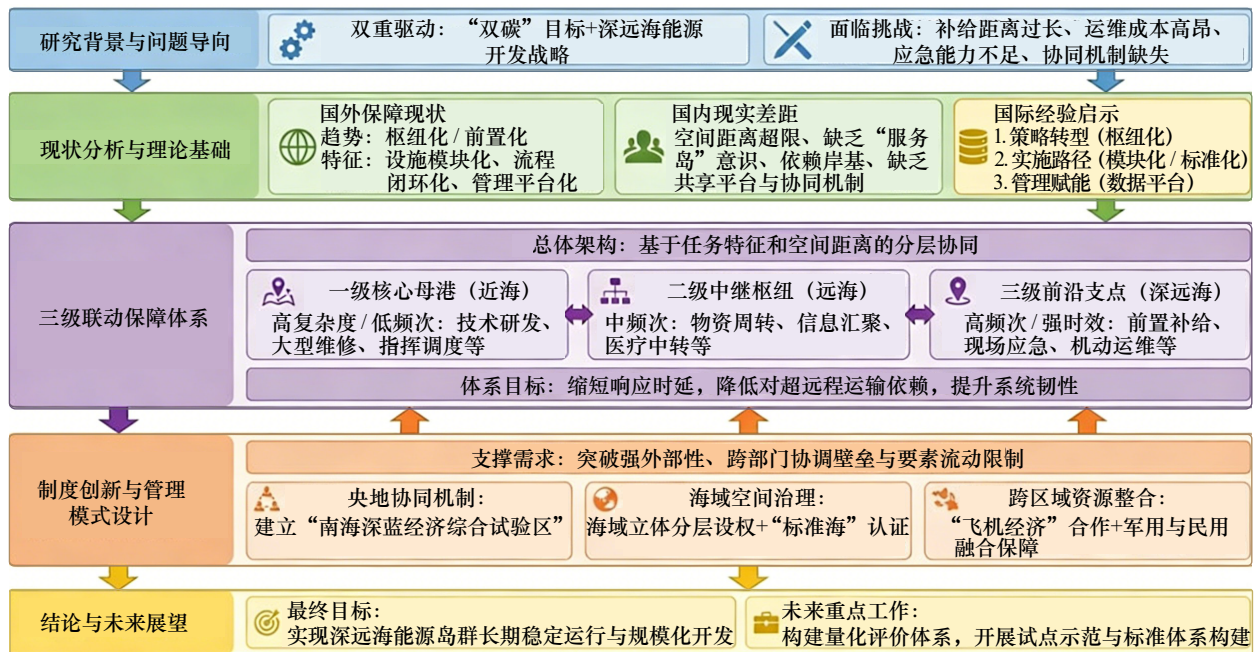


图1 南海深远海能源岛三级联动保障体系研究逻辑框架图

可提供研发、测试、运维技术支持和调度指挥等高端支撑<sup>[36]</sup>。同时，南海常态化救助力量、澄迈马村港航空保税维修能力以及八所港、清澜港等资源，也为远海运输、救援和新能源补给提供了岸基基础。

远海中继层是岸基保障能力向深远海延伸的关键过渡层。西沙永兴岛作为三沙市政府驻地，已具备机场、码头、海水淡化、电力供应、医疗服务和通信保障等条件，可为远海补给、人员轮换、医疗中转和信息传输提供支撑<sup>[37-39]</sup>。其功能重点不在于替代海南本岛，而在于将“近海-深远海”的超长保障链条拆分为可接续、可周转、可调度的中程保障环节，降低长距离直达补给压力。

深远海前沿层距核心母港通常超过约324 n mile，部分重点节点超过约486 n mile，具有补给链条长、海况影响强、应急窗口短和岸基直达成本高等特征。相关前沿节点已建成机场、港口、住宿、医疗、通信和助航设施，具备直升机与大型运输机起降、工程船舶靠泊装卸、通信中继和基本医疗处置能力，并与灯塔、船舶自动识别系统、超短波等共同构成深远海航运通达和安全保障基础网络<sup>[40]</sup>。

### (三) 三级联动保障体系的功能边界与总体架构

现有南海保障体系存在明显的结构性矛盾：海

南本岛资源集聚度高、专业能力强，但距深远海前沿节点较远，响应链条长；永兴岛和深远海前沿节点位置靠前，但资源规模和专业维修能力有限。由于缺少统一的备件体系、运维组织和应急联动机制，各节点尚未形成高效接力式保障网络。

基于上述矛盾，本文提出构建“核心母港-中继枢纽-前沿支点”三级联动保障体系，如图2所示。该体系并非简单增加远海保障设施，而是借鉴枢纽-辐射网络的组织逻辑，通过核心母港集聚资源、中继枢纽接力转换、前沿支点近域响应，将传统岸基直达保障转化为分段接续、分级响应和多节点协同的保障网络。相关海运网络研究表明<sup>[41]</sup>，在港口失效、链路中断或节点拥堵情景下，备用枢纽和替代路径能够提升网络可靠性，并改善容量调度与资源分配效率。因此，南海能源岛三级联动保障体系的关键在于建立可切换、可接续、可冗余的网络化保障结构。

从总体架构看，近海支撑层以海南本岛港口群为核心母港，重点承担战略物资储备、大型装备检修、人员培训、统一调度和综合应急指挥等任务；远海中继层以西沙永兴岛等节点为中继枢纽，重点承担物资缓存、人员轮换、医疗中转、信息汇聚和应急接力等任务；深远海前沿层以前沿节点和机动

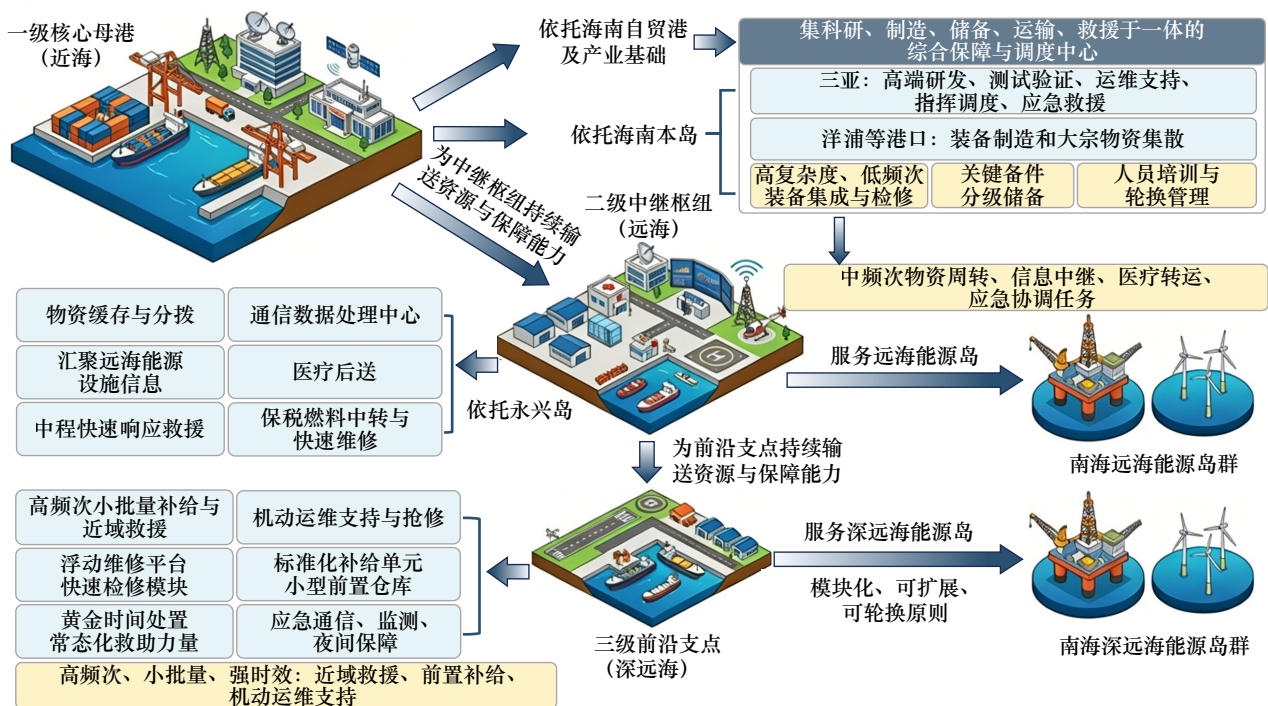


图2 南海现有节点基础设施分布与“核心母港-中继枢纽-前沿支点”三级联动保障体系示意图

保障平台为前沿支点，重点承担前置补给、现场抢修、初步医疗、应急通信和近域救援等任务。三类节点通过物资流、人员流、信息流和应急响应流相互衔接，形成“后方集聚-中程接续-前沿响应”的运行格局。

本文所称“三级联动”并非单纯按照空间距离划分节点，而是依据任务复杂度、发生频次、响应时效、资源规模和协同接口进行功能分层。低频、高复杂度和重资产任务应集中在核心母港进行处理；中频、接口型和接力式任务由中继枢纽承担；高频、小批量和强时效任务应前置至前沿支点。南海岛群现有基础设施与能力基础如表5所示，三级节点功能边界如表6所示。

由表5和表6可见，三级联动体系的核心在于“功能差异化”和“接口标准化”。核心母港解决资源集聚和复杂任务处理问题，中继枢纽解决长链保障中的接力转换问题，前沿支点解决现场快速响应问题。通过标准化补给接口、信息共享接口、医疗转运接口和应急升级接口，三级节点可在常态运行中实现分工协同，在突发事件中实现快速切换，从而将传统单点、长链、慢响应的保障模式转化为多节点、分段式、韧性化的运行保障网络。

#### （四）节点功能定位与建设路径

在明确三级功能边界后，各层级节点建设应围绕任务属性展开，避免功能重复和资源错配。

核心母港应依托海南本岛港口、产业和政策基础，建设成为南海能源岛群综合保障与调度中心。其重点功能包括装备集成与检修、关键部件和备件储备、人员培训与轮换管理、跨海域应急指挥和航空救援统筹。具体可依托三亚崖州湾科技城承载研发、测试验证和调度指挥功能，利用洋浦等港区发展海洋工程装备制造、总装和大宗物资集散，并强化三亚及周边救助基地的应急救援母港职能。

中继枢纽应以永兴岛等远海节点为基础，强化周转、接力、汇聚、转运能力。其重点不是替代核心母港，而是提高长链保障过程中的衔接效率。建设重点包括小批量物资缓存、冷链储运、燃料补给、人员轮换、医疗后送、通信中继和运行数据汇聚。同时，可探索将海南自贸港在保税维修、燃料补给、设备周转和通关便利化方面的政策优势延伸至远海中继节点，提高中继枢纽运行效率。

前沿支点应面向高频次、小批量、强时效的近域救援、前置补给和机动运维任务展开建设。应优先选择具备机场、港口和基础医疗条件的深远海骨

表5 南海岛群现有基础设施与能力基础

| 空间层级 | 代表节点     | 现有基础设施   | 能力基础                               |
|------|----------|--|------------------------------------|
| 近海   | 海南本岛港口群  | 深水泊位<br>油气储备<br>港口物流<br>科研机构<br>装备制造<br>技术服务资源 | 岸基资源集聚度高，具备大宗物资集散、装备测试、技术服务和综合调度基础 |
| 远海   | 西沙永兴岛等节点 | 机场<br>码头<br>海水淡化<br>电力供应<br>医疗服务<br>通信设施       | 具备中程接续、基础补给、人员驻留、信息汇聚和医疗中转基础       |
| 深远海  | 深远海前沿节点  | 机场<br>港口<br>住宿<br>医疗<br>通信<br>助航<br>油料         | 具备基础通达、驻留保障、近域救援和初步应急处置条件          |

表6 三级联动保障体系功能边界与协同接口

| 保障层级 | 空间定位       | 主要任务                                 | 任务属性                 | 响应时效           | 协同接口         |
|------|------------|--------------------------------------|----------------------|----------------|--------------|
| 核心母港 | 海南本岛及近岸港口群 | 大型检修                                 | 低频                   | 小时级调度          | 资源输出         |
|      |            | 战略物资储备<br>人员培训<br>统一调度<br>综合救援指挥     | 高复杂度<br>重资产          | 日级运输           | 统一调度         |
| 中继枢纽 | 西沙永兴岛等远海节点 | 物资缓存<br>人员轮换<br>医疗中转<br>信息汇聚<br>应急接力 | 中频<br>中等复杂度<br>接口型资源 | 小时级响应<br>半日级转运 | 接力分拨<br>信息汇聚 |
| 前沿支点 | 深远海能源岛邻近节点 | 前置补给<br>现场抢修<br>初步医疗<br>应急通信<br>近域救援 | 高频<br>强时效<br>模块化资源   | 分钟至小时级响应       | 状态反馈<br>升级响应 |

干节点作为一线保障基地，采用固定设施与机动平台相结合的模式，部署浮动维修平台、快速检修模块、小型前置仓库、标准化补给单元和应急通信设备。前沿支点应坚持模块化、可扩展、可轮换和可替代原则，与中继枢纽、机动维修平台和相邻前沿节点共同构建接力式、冗余式运维与救援链条。

#### （五）极端场景下的系统韧性与失效应对机制

三级联动保障体系不能建立在各节点始终可用、各链路始终畅通的理想假设之上。南海深远海能源岛群长期运行可能受到台风、强对流天气、设备故障、航线中断、通信受阻、事故并发和资源短时超载等因素影响，导致核心母港、中继枢纽或前沿支点阶段性失效。关键基础设施韧性研究表明<sup>[42]</sup>，网络系统在扰动条件下的服务能力不仅取决于单个节点强度，也与网络拓扑、节点互依关系、替代链路、需求满足能力和恢复路径密切相关。

本文所称系统韧性，是指三级联动保障体系在遭遇节点失效、链路中断、资源超载或外部扰动时，仍能通过备用节点切换、资源重分配、任务降级运行和应急链路重构等方式维持最低保障能力，并在扰动结束后恢复常态运行的能力。因此，南海能源岛群保障体系应在常态建设阶段即嵌入冗余节点、备用通道、前置库存和跨节点调度规则，避免极端场景下退化为单一母港依赖模式。

面向南海场景，三级联动保障体系韧性设计应遵循四项原则：一是节点冗余，在核心母港、中继枢纽和前沿支点之间设置备用节点和可替代资源，避免关键节点单点失效；二是链路冗余，同时配置海运、航空、无人运输和卫星通信等多类型通道，降低单一航线或通信链路中断风险；三是能力下沉，将高频次、强时效、小批量保障资源适当前置到中继枢纽和前沿支点，减少对核心母港远距离直达支援的依赖；四是分级响应，根据事件等级、人员安全、能源连续性和生态风险确定资源调用顺序，实现现场处置、中继接力和母港支援的逐级升级。

#### （六）典型任务情景测算与保障效率对比

为验证三级联动保障体系对保障效率的改善作用，本文选取急需备件补给和人员医疗救援两类强时效任务，开展传统单一母港直达模式与三级联动模式的简化情景测算。该测算不作为工程实施阶段的精确设计参数，仅用于比较不同保障模式下运输距离、响应时间和资源占用的相对差异。

本文将海南本岛核心母港至深远海前沿节点的典型距离设为 900 km；将远海中继枢纽至深远海前沿支点的典型距离设为 300 km。海上补给船参数采用“海洋石油 295 船”动复员测算参数，取航速为 12 节（1 节=1.852 km/h）、航行燃油用量为 1.2 t/h、

燃油价格为9000元/t。航空救援参数采用南海海难救援飞机优选研究中的EC225大型救助直升机参数<sup>[43]</sup>,取航速为324 km/h、最大航程为943 km、救援半径为410 km。

海上补给响应时间估算为:

$$T_s = T_p + T_1 + \frac{D_s}{V_s} + T_u + T_w \quad (1)$$

式(1)中,  $T_s$ 为海上补给总响应时间,  $T_p$ 为调度准备时间,  $T_1$ 为装载时间,  $D_s$ 为海上运输距离,  $V_s$ 为补给船航速,  $T_u$ 为卸载或交接时间,  $T_w$ 为气象窗口等待时间。为便于比较,基础测算暂不计入气象窗口等待时间,即  $T_w = 0$ 。

船舶航行燃油费用估算为:

$$C_f = \frac{D_s}{V_s} \times Q_h \times P_f \quad (2)$$

式(2)中,  $C_f$ 为航行燃油费用,  $Q_h$ 为单位时间燃油消耗,  $P_f$ 为燃油价格。

航空救援响应时间可表示为:

$$T_a = T_p + \frac{D_a}{V_a} \quad (3)$$

式(3)中,  $T_a$ 为航空救援到达时间,  $D_a$ 为飞行距离,  $V_a$ 为直升机巡航速度。传统单一母港模式与三级联动模式的测算结果如表7所示。

由表7可见,三级联动保障体系对强时效任务具有明显改善作用。对于急需备件补给,中继枢纽前置缓存可将有效海上运输距离由约486 n mile压缩至约162 n mile,使响应时间和燃油费用均降低约2/3。对于人员医疗救援,三级联动保障体系不

仅缩短了理论到达时间,还可将任务距离控制在EC225大型救助直升机救援半径内,使原本依赖远距离直达或中途补给的任务转化为常规半径内的可执行任务。由此可见,三级联动保障体系的效率优势主要来自高频任务前置化、应急任务分级化和复杂任务后方化。

#### 四、海上能源岛制度创新与管理模式设计

南海深远海能源岛群运行保障体系的落地,不仅取决于工程节点布局,还取决于制度体系能否支撑跨区域资源配置、复合用海管理、项目审批、数据共享和多主体协同。工程体系解决“节点如何布局、任务如何分层、资源如何配置”的问题,制度创新则解决“权责如何界定、项目如何落地、资源如何流动、主体如何协同”的问题。二者应形成“工程需求牵引制度供给、制度供给支撑工程落地”的耦合关系。

##### (一) 制度创新与工程体系的耦合逻辑

三级联动保障体系在运行中主要面临五类制度性约束:一是跨部门审批链条长,影响能源岛、补给设施、海上风电、海底管廊和应急节点协同落地;二是多功能用海边界不清,易引发风电开发、航道通行、渔业生产、海底电缆和锚泊系统之间的空间冲突;三是远海节点公共服务和资源调用规则不足,制约中继枢纽与前沿支点连续运行;四是装

表7 传统单一母港模式与三级联动模式典型任务响应效率对比

| 典型任务   | 对比模式              | 典型距离                    | 速度参数              | 主要时间构成                                 | 估算响应时间  | 成本或可达性变化                         |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|--|---------|----------------------------------|
| 急需备件补给 | 传统单一母港直达          | 约486 n mile<br>(900 km) | 补给船12节            | 调度6 h<br>+装载3 h<br>+航行40.5 h<br>+卸载2 h | 约51.5 h | 航行燃油约48.6 t<br>费用约43.74万元        |
|        | 三级联动, 中继枢纽缓存后发出   | 约162 n mile<br>(300 km) | 补给船12节            | 调度2 h<br>+装载1 h<br>+航行13.5 h<br>+卸载1 h | 约17.5 h | 响应时间降低约66%<br>燃油费用降低约66.7%       |
| 人员医疗救援 | 传统单一母港直达          | 约486 n mile<br>(900 km) | EC225<br>324 km/h | 起飞准备0.5 h<br>+飞行2.78 h                 | 约3.28 h | 超出EC225救援半径410 km<br>常规闭环救援可达性不足 |
|        | 三级联动, 中继枢纽或前沿机动平台 | 约162 n mile<br>(300 km) | EC225<br>324 km/h | 起飞准备0.5 h<br>+飞行0.93 h                 | 约1.43 h | 到达时间降低约56.4%<br>处于救援半径内, 可达性提高   |

备制造、备件储备、保税维修和专业人才供给分散，影响岸基产业链与远海保障链衔接；五是海空救援、通信观测、医疗后送和应急处置涉及多主体协同，亟需统一标准和联动程序。

因此，制度创新不应停留于原则性倡议，而应围绕具体工程瓶颈形成可操作的制度工具组合，如表8所示。

## （二）南海深蓝经济综合试验区的制度定位

南海深蓝经济综合试验区应定位为国家授权下的政策试验平台、跨部门协调平台和工程示范平台，而非新增行政区或独立审批体系。其核心功能是围绕深远海能源岛群建设中的复合用海审批、远海补给服务、装备维修周转、数据共享、应急联动和试验示范等事项，建立统一规则、统一接口和统一协调机制。

从法律地位看，试验区可作为海南自由贸易港制度在深远海能源开发与运行保障领域的功能延伸，重点探索装备保税维修、航运物流便利化、跨境技术服务、数据安全有序流动和绿色金融支持等政策工具。从管理机构看，可采用“国家有关部门指导-海南省统筹-三沙市及相关市/县协同-平台化机构运营”的组织模式。其中，国家有关部门负责政策指导与试点评估，海南省负责建设方案和项目清单统筹，三沙市及相关市/县负责远

海节点公共服务、属地协调和基础设施运行管理。

从部门职能看，试验区应纳入自然资源主管部门统一的国土空间用途管制和海域海岛管理框架，涉及海域使用、海岛保护、海底电缆管道、立体分层设权和“标准海”单元划定等事项，不宜另设独立审批体系。从资金来源看，可形成“中央专项资金引导、海南省及相关市/县配套、重大工程投资、能源企业和港航企业投入、政策性金融与社会资本参与”的多元化投入结构。从试点范围看，不宜覆盖整个南海海域，而应按照“岸基母港-远海中继-前沿示范”的路径分阶段推进，先行覆盖海南本岛核心母港、三沙市永兴岛等远海中继节点、若干深远海前沿节点和海上综合试验平台，待评估成熟后逐步扩展。

通过上述安排，试验区的作用不是替代海南自由贸易港、三沙市现有治理体系和自然资源主管部门职责，而是在既有制度之间建立面向深远海能源岛群的综合协调接口。

## （三）“标准海单元+立体分层设权”的空间治理机制

南海能源岛群及其配套工程具有显著的立体复合用海特征。同一海域内，可能同时涉及海面风电开发、航道通行、水体养殖、海底电缆管廊、底土基础、锚泊系统、取排水工程和应急通道等多类功

表8 制度创新与工程体系的耦合关系

| 制度工具        | 主要解决的工程瓶颈   | 对应工程环节          | 作用路径   | 支撑的三级节点    |
|-------------|-------------|-----------------|--------|------------|
| 南海深蓝经济综合试验区 | 跨部门审批链条长    | 能源岛、风电、管廊、补给节点、 | 统一规则   | 核心母港、中继枢纽、 |
|             | 跨区域协调难      | 试验平台            | 统一接口   | 前沿支点       |
|             | 试点政策分散      |                 | 统一协调   |            |
| 海域立体分层设权    | 多功能用海冲突     | 风电、航道、养殖、电缆管廊、  | 分层确权   | 中继枢纽、前沿支点  |
|             | 空间边界不清      | 锚泊系统            | 功能兼容   |            |
|             | 权责划分不明      |                 | 安全边界控制 |            |
| “标准海”用海单元认证 | 逐项论证周期长     | 前沿支点、补给设施、能源平台、 | 区域整体论证 | 前沿支点、中继枢纽  |
|             | 审批不确定性高     | 试验场             | 标准单元供给 |            |
|             | 重复论证成本高     |                 | 项目快速适配 |            |
| “飞地经济”合作机制  | 装备制造        | 装备集成、备件供应、维修保障、 | 规划共建   | 以核心母港为主，服务 |
|             | 备件储备        | 应急物资储备          | 成本共担   | 中继枢纽与前沿支点  |
|             | 维修和人才供给分散   |                 | 收益共享   |            |
| 海空应急协同保障机制  | 搜救、医疗、通信和应急 | 事故响应、人员撤离、医疗转运、 | 统一预案   | 中继枢纽、前沿支点、 |
|             | 指挥协同不足      | 通信保障            | 资源清单   | 核心母港统筹     |
|             |             |                 | 联合演练   |            |
|             |             |                 | 分级响应   |            |

能。传统二维平面用海审批模式难以准确表达海域空间的立体利用关系，容易引发功能冲突、权责交叉、重复论证和审批周期延长等问题。为提高空间治理效率，有必要将“标准海”用海单元认证与海域立体分层设权一体化推进，形成以单元供给、分层确权、项目适配和动态监管为核心的治理机制<sup>[44]</sup>。

“标准海”用海单元认证主要解决“哪些海域具备开发条件、项目能否快速进入”的问题；海域立体分层设权主要解决“同一用海单元内不同空间层如何利用、功能之间如何兼容、权责边界如何划分”的问题。二者应形成“先单元划定、后分层设权；先整体论证、后项目适配；先权责界定、后动态监管”的协同关系。

具体而言，可先基于国土空间规划、海洋功能区划、生态保护红线、航道锚地、能源资源、现有用海权和海洋环境条件，划定若干“标准海”候选单元；随后开展区域整体论证，明确生态承载力、通航安全、能源开发适宜性、海底管廊条件、灾害风险和安全约束；在通过整体论证的单元内部，再按照水面、水体、海床、底土等空间层级开展立体分层设权，明确主导功能、兼容功能、限制功能和禁止功能<sup>[45]</sup>。

在项目落地环节，应将能源岛、前沿支点、海上风电、海上制氢、补给节点、应急平台和海底电缆管廊等项目纳入“标准海”单元进行适配审查。符合准入条件和分层权责要求的项目，可进入简化审批、权属登记、施工许可和运行监管程序；不符合条件或与既有功能冲突的项目，则应进行空间调整、功能替代或退出。通过这一机制，可将传统“项目提出-逐项论证-反复协调-单独审批”的后置式审批逻辑，转化为“单元划定-整体论证-分层确权-项目适配-动态监管”的前置式治理链条。

为保障该机制有效运行，应建立“一个底图、一个编码、一个数据库”的空间治理数据接口。“标准海”单元应实行统一空间编码，将用海单元边界、空间分层、权利主体、限制条件、生态红线、航道要求、安全缓冲区和项目运行状态纳入同一数据底座，并通过动态监测和周期性评估及时更新准入条件、功能兼容清单和风险控制要求<sup>[46]</sup>。

在权责配置方面，应形成“单元管理权-分层

使用权-项目运营权-监管责任”相衔接的权责结构。自然资源主管部门负责“标准海”单元划定、分层设权规则制定和权属登记；项目主体依法取得相应空间层级的海域使用权或项目运营权；交通海事、生态环境、应急管理等部门依据职责实施专项监管；试验区综合协调平台负责跨部门争议协调、项目清单管理和绩效评估。该机制可为能源岛、前沿支点、补给节点和海底管廊等工程落地提供清晰的制度链条。

“标准海单元+分层设权”联合审批流程如图3所示。该流程以统一数据底座为基础，以“标准海”单元划定为入口，以立体分层设权为权责配置工具，以项目适配审查为落地环节，以动态监管和单元条件更新为闭环反馈机制。

#### （四）跨区域资源整合模式

##### 1. “飞地经济”合作机制

南海能源岛群保障体系涉及装备制造、关键部件供应、保税维修、应急物资储备和专业人才供给等多类要素，具有明显的跨区域组织特征。由于能源岛群作业空间远离大陆，单一行政区难以独立承担完整产业链和保障链功能，亟需通过跨区域协作实现岸基产业资源与远海运行需求衔接。“飞地经济”模式可通过规划共建、运营共管、成本共担和收益共享，打破行政边界对要素流动的限制，为核心母港向中继枢纽和前沿支点持续输出装备、备件、维修和人才支撑提供制度化通道<sup>[47,48]</sup>。

在实施路径上，可依托海南、深圳、浙江等海洋装备制造和港航服务基础较好的地区，共建能源岛飞地产业协作园，重点承接海工装备总装、关键部件配套、保税维修、应急物资储备、远程运维服务和专业培训等功能。园区可采取市场化平台公司运营模式，建立跨地区项目清单、成本分担、税收收益共享和统计考核口径统一机制，避免因利益分配不均导致合作不可持续。将飞地合作纳入“南海深蓝经济综合试验区”协调框架，有助于降低跨区域协作的制度性交易成本，增强三级联动保障体系的资源供给稳定性。

##### 2. 海空应急协同保障机制

南海能源岛群位于深远海复杂环境，其连续运行和突发事件处置高度依赖海上搜救、航空转运、应急通信、医疗后送、物资补给和现场抢修等高

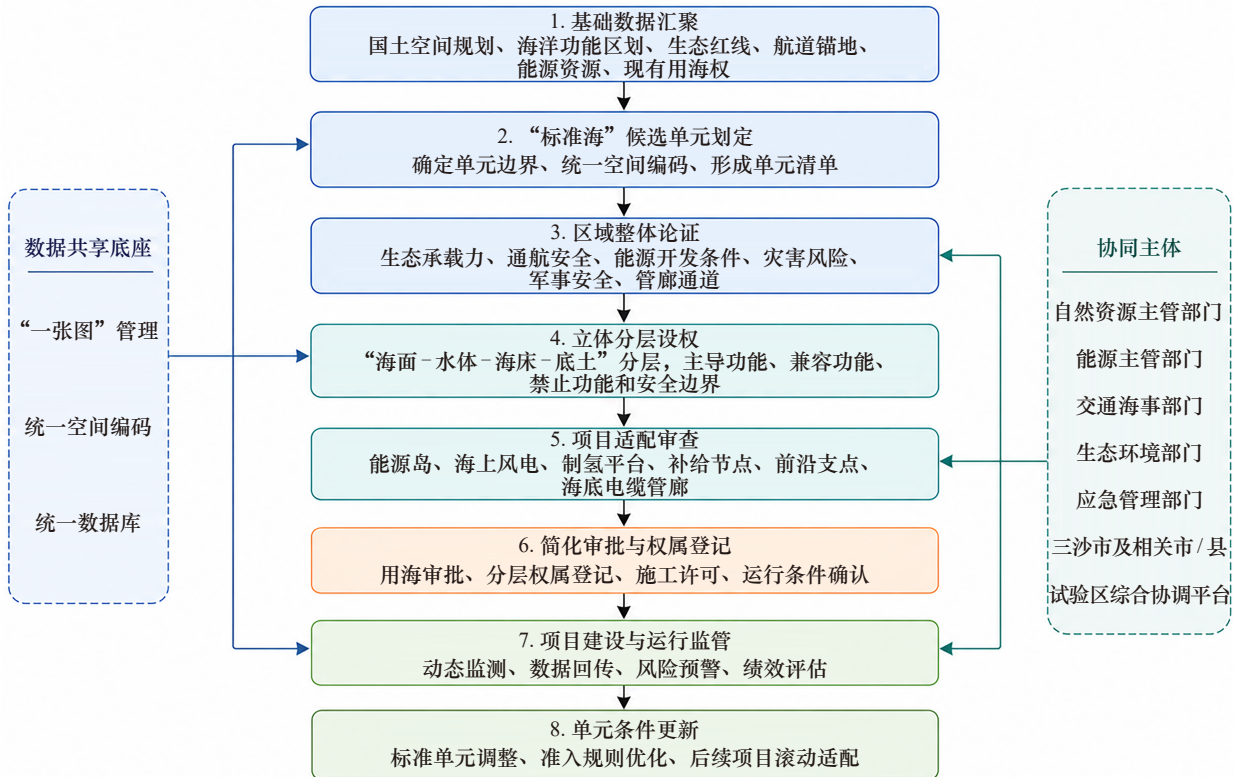


图3 “标准海单元+分层设权”联合审批流程图

可靠性保障能力。远海能源设施运维研究表明<sup>[33]</sup>，运维活动不仅涉及成本和可靠性，也直接关系到作业人员安全和海洋生态影响。因此，南海能源岛群海空应急协同保障机制不应仅关注事故发生后的救援响应，还应将人员安全管理、作业过程监管、维护质量控制和生态风险防控纳入常态化运行体系。

上述能力分散在海事、应急、交通救捞、自然资源、地方政府、能源企业和港航企业等多类主体之中，单一主体难以独立满足强时效、高风险和多任务并发条件下的保障需求。因此，本文将重点围绕公共应急、海空救援、通信保障、资源调度和跨部门联动等具体场景，构建可执行、可检查、可复盘的协同规则<sup>[49]</sup>。

该机制应重点包括四项内容：一是建立分级响应机制，依托试验区综合协调平台，形成“常态准备-预警联动-应急处置-恢复评估”的闭环流程，明确属地政府、海上搜救机构、能源企业、核心母港、中继枢纽和前沿支点在不同事件等级下的职责；二是建立信息分级共享机制，按照“最小必要、分级授权、用途限定、过程留痕”的原则，对

海况气象、设备状态、人员健康、物资库存、船机位置和应急事件等数据进行分类共享，对敏感信息采取坐标模糊化、区域网格化、设备匿名化、时间延迟发布和专用通道传输等脱敏措施；三是建立资源共享协议机制，明确直升机、救助船、补给船、应急通信设备、医疗资源、燃料、备件、临时靠泊设施和机动维修模块等资源的权属主体、调用权限、响应时限、费用分担、损耗补偿和保险责任；四是建立联合演练与标准接口机制，围绕通信链路切换、海空联合转运、远程医疗会诊、补给船与直升机协同、应急物资跨节点调用等场景，定期开展跨主体联合演练，并将演练结果纳入试验区年度评估和节点能力复核。

通过“飞地经济”合作机制与海空应急协同保障机制协同推进，可分别从产业资源供给和突发事件响应两个层面支撑三级联动保障体系运行。前者解决装备、备件、维修和人才等基础要素的跨区域供给问题，后者解决深远海突发事件中的跨主体调度和应急处置问题。二者共同作用，可将南海能源岛群保障体系由节点布局设计转化为可组织、可调用、可评估的运行机制。

## 五、结论与展望

本文围绕南海深远海能源岛群规模化运行面临的保障半径大、补给链条长、应急响应慢和多主体协同不足等问题，构建了“核心母港—中继枢纽—前沿支点”三级联动保障体系，并从空间分层、功能配置、效率测算、韧性设计和制度创新等方面进行了系统分析，主要结论如下。

(1) 南海能源岛群不应仅被视为单一能源生产或外送设施，而应理解为兼具“物理岛”“服务岛”属性的复合型工程平台。其运行保障体系需同步覆盖能源供给、物资补给、设备运维、应急救援、医疗后送、通信中继和数据服务等功能。随着南海能源开发由近岸向深远海延伸，传统近岸母港直达式保障模式已难以满足多节点、强时效和连续化运行需求。

(2) 本文提出的三级联动保障体系，可将南海能源岛群运行保障空间划分为近海支撑层、远海中继层和深远海前沿层。其中，核心母港依托海南本岛港口群和产业基础，承担资源集聚、综合调度、重型维修和复杂应急任务；中继枢纽依托西沙永兴岛等远海节点，承担物资缓存、人员轮换、医疗中转、信息汇聚和接力转运任务；前沿支点依托深远海前沿节点和机动平台，承担近域救援、现场抢修、前置补给和应急通信任务。该体系能够将传统长链条保障模式转化为分段接力、分级响应和网络协同模式。

(3) 典型任务情景测算表明，三级联动保障体系对高频次、小批量和强时效任务具有明显的效率优势。在急需备件补给任务中，中继枢纽的前置缓存可将有效运输距离由约486 n mile压缩到约162 n mile，使估算响应时间由约51.5 h降至约17.5 h，降幅约为66%，燃油费用同步降低约66.7%；在人员医疗救援任务中，中继或前沿响应模式可将救援力量到达时间由约3.28 h降至约1.43 h，降幅约为56.4%，并将任务距离控制在EC225大型救助直升机常规救援半径内。上述结果表明，三级联动保障体系有助于缩短响应时间，提高远海救援可达性和运行安全裕度。

(4) 三级联动保障体系的稳定运行需要制度创新同步支撑。本文提出以南海深蓝经济综合试验区为政策试验和综合协调平台，衔接海南自由贸易

港、三沙市现有治理体系和自然资源主管部门海域海岛管理职责，协同推进“标准海”用海单元认证与海域立体分层设权，形成“单元划定—整体论证—分层确权—项目适配—动态监管”的空间治理链条。同时，通过“飞地经济”合作机制和海空应急协同保障机制，强化岸基产业链与远海保障链衔接，提升突发事件下的资源调用、信息共享和联合处置能力。

(5) 未来研究应进一步面向工程验证和量化评价深化。一方面，应构建以保障半径、响应时间、系统可用度、资源占用和全生命周期成本为核心指标的综合评价体系，为不同保障方案的比较、优化和决策提供量化依据；另一方面，应依托南海深蓝经济综合试验区开展典型场景试点，重点验证远海备件前置、医疗后送接力、海空联合救援、跨节点调度和预测性维护等关键环节的运行效果。通过试点示范、数据平台建设和标准体系完善，逐步形成可复制、可扩展的南海深远海能源岛群运行保障模式。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** March 5, 2026; **Revised date:** May 1, 2026

**Corresponding author:** Wang Guorong is a professor from Energy Equipment Research Institute, Southwest Petroleum University. His major research fields include oil and gas equipment development and energy comprehensive utilization. E-mail: wanggr@swpu.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering projects “Strategic Research on Deep and Offshore Energy Development and Ecological Environment Protection” (25HNZX-04), “Strategic Research on Integrated and Collaborative Development of Offshore Energy” (2025-HZ-30)

### 参考文献

- [1] 田辰玲, 杨建民, 林忠钦, 等. 我国南海资源开发装备发展研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 84–94.  
Tian C L, Yang J M, Lin Z Q, et al. Development of resource exploitation equipment for South China Sea [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 84–94.
- [2] 庞雄奇, 胡涛, 蒲庭玉, 等. 中国南海天然气水合物资源产业化发展面临的风险与挑战 [J]. 石油学报, 2024, 45(7): 1044–1060.  
Pang X Q, Hu T, Pu T Y, et al. Risks and challenges of the industrial development of methane hydrate resources in the South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(7): 1044–1060.
- [3] 任国瑞, 闫旭辰, 王玮, 等. 中国海上风光波浪能互补性评估研究 [J]. 太阳能学报, 2025, 46(10): 369–378.  
Ren G R, Yan X C, Wang W, et al. Assessment of complementarity of wind, solar and wave energy at sea in China [J]. Acta Ener-

- giae Solaris Sinica, 2025, 46(10): 369–378.
- [4] 刘杨. 打造绿色能源岛 油气与新能源融合发展 [N]. 中国证券报, 2024-06-04(A05).  
Liu Y. Building a green energy island: The integrated development of oil, gas, and new energy [N]. China Securities Journal, 2024-06-04(A05).
- [5] 武贺, 方叙洲, 张松, 等. 南海岛礁海域波浪能资源分析及总量评估 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 416–423.  
Wu H, Fang Y Z, Zhang S, et al. Wave energy characterization and potential estimation for islands of South China Sea [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2022, 43(9): 416–423.
- [6] 高越, 于青双, 刘广波. 南海海域温差能资源分布特性及站点选址研究 [J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(4): 145–150.  
Gao Y, Yu Q S, Liu G B. Research on the distribution characteristics of temperature difference energy and site selection in the South China Sea [J]. Port, Waterway and Offshore Engineering, 2024, 61(4): 145–150.
- [7] 陈梦圆, 秦传新, 刘永, 等. 基于 SWOT 分析的南海区海洋牧场发展路径 [J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(9): 117–127.  
Chen M Y, Qin C X, Liu Y, et al. Development path of marine ranching in South China Sea based on SWOT analysis [J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(9): 117–127.
- [8] 施建臣, 史大林. 关于在南沙群岛海域设立“南海牧场”的建议 [J]. 中国发展, 2024, 24(1): 41–44.  
Shi J C, Shi D L. Proposal on establishing “South China marine ranching” in the waters of Nansha Islands [J]. China Development, 2024, 24(1): 41–44.
- [9] 汤光伟, 秦雅茹, 徐莹. 助推军民融合的南海军地两用人才培养模式研究与实践 [J]. 新教育(海南), 2025 (28): 7–9.  
Tang G W, Qin Y R, Xu Y. Research and Practice on Training Mode of Dual-use Military and Civil Talents in South China Sea to Boost integration of defense and civilian technologies [J]. New Education, 2025 (28): 7–9.
- [10] 苏丕波, 梁金强, 张伟, 等. “双碳”目标下天然气水合物勘查开发战略与思考 [J/OL]. 地质学报, 1–15[2026-01-22]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025374>.  
Su P P, Liang J Q, Zhang W, et al. Strategies and thoughts on the exploration and development of natural gas hydrates under the “carbon neutrality” goal [J/OL]. Acta Geologica Sinica, 1–15[2026-01-22]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025374>.
- [11] 王伟. 海南建设“清洁能源岛” [N]. 经济日报, 2023-07-30(06).  
Wang W. Hainan’s construction of a “clean energy island” [N]. Economic Daily, 2023-07-30(06).
- [12] Abid H, Mathiesen B V, Skov I R, et al. The future of Danish offshore wind: Integration and export strategies for energy hubs in the North Sea [J]. Smart Energy, 2026, 21: 100224.
- [13] Rettig E, Fischhendler I, Schlecht F. The meaning of energy islands: Towards a theoretical framework [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187: 113732.
- [14] Marcinkowski H M, Østergaard P A, Mauger R. Energy transitions on European islands: Exploring technical scenarios, markets and policy proposals in Denmark, Portugal and the United Kingdom [J]. Energy Research & Social Science, 2022, 93: 102824.
- [15] Energy Ireland. Denmark’s energy islands: A paradigm shift [EB/OL]. (2022-03-09)[2026-01-29]. <https://www.energyireland.ie/denmarks-energy-islands-a-paradigm-shift/>.
- [16] Danish Energy Agency. The Energy island in the North Sea: Teaser for potential investors [EB/OL]. (2022-11)[2026-01-29]. <https://ens.dk/media/5201/download>.
- [17] Danish Energy Agency. North sea energy island: Framework for the coming draft plan to be used for the strategic environmental assessment [R]. Copenhagen: Danish Energy Agency, 2022.
- [18] Holcim. Princess elisabeth energy island, Belgium [EB/OL]. (2024-12-11)[2026-01-29]. <https://buildingicons.holcim.com/icon/princess-elisabeth-island>.
- [19] Koh P. The world’s first artificial energy island [EB/OL]. (2025-04-24)[2026-01-29]. <https://www.eib.org/en/stories/offshore-wind-energy-island-belgium>.
- [20] 丁健. 发展海上能源岛的欧洲经验与中国借鉴 [J]. 自然资源情报, 2025 (6): 101–107.  
Ding J. European experience in developing offshore energy islands and China’s reference [J]. Natural Resources Information, 2025 (6): 101–107.
- [21] Wiegner J F, Andreasson L M, Kusters J E H, et al. Interdisciplinary perspectives on offshore energy system integration in the North Sea: A systematic literature review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113970.
- [22] Hahn B. Wind farm data collection and reliability assessment for O&M optimization: First edition, 2017 [EB/OL]. (2017-05)[2026-01-29]. <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/RP-17-Reliability.pdf>.
- [23] Mendez-Morales M, Karipoglu F, Ivanković M, et al. Transforming Crete’s sustainable energy landscape: A modular energy island approach [J]. International Journal of Energy Research, 2025, 2025(1): 2363366.
- [24] Praene J P, David M, Sinama F, et al. Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 426–442.
- [25] Kurniawati I, Beaumont B, Varghese R, et al. Conceptual design of a floating modular energy island for energy independency: A case study in Crete [J]. Energies, 2023, 16(16): 5921.
- [26] Vattenfall A B. Interim report January–June 2023 [EB/OL]. (2023-07-18)[2026-04-28]. [https://group.vattenfall.com/siteassets/corporate/investors/interim\\_reports/2023/q2\\_report\\_2023.pdf](https://group.vattenfall.com/siteassets/corporate/investors/interim_reports/2023/q2_report_2023.pdf).
- [27] 张旭, 姚伟家, 陈亮宇, 等. 江苏省海上能源岛选址研究 [J]. 风能, 2025 (8): 50–55.  
Zhang X, Yao W J, Chen L Y, et al. Study on the location of offshore energy island in Jiangsu Province [J]. Wind Energy, 2025 (8): 50–55.
- [28] 人民政协网. 舒印彪委员: 推进我国海上风电规模化开发, 助力实现“双碳”目标 [EB/OL]. (2022-03-07)[2025-05-10]. <https://www.rmzxx.com.cn/c/2022-03-07/3068816.shtml>.  
People’s Political Consultative Conference Network. Shu Yinbiao Member: Promoting large-scale development of offshore wind power in china to assist in achieving the “carbon neutrality” goals [EB/OL]. (2022-03-07)[2025-05-10]. <https://www.rmzxx.com.cn/c/2022-03-07/3068816.shtml>
- [29] 刘钟淇, 刘耀, 侯金鸣. 以深远海风电为核心的能源岛能源外送经济性分析 [J]. 中国电力, 2024, 57(9): 94–102.  
Liu Z Q, Liu Y, Hou J M. Economic analysis of energy transmis-

- sion for energy island based on deep-sea offshore wind farms [J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 94–102.
- [30] 杨歌. 国内首个海上综合能源岛创新平台正式启动 [N]. *机电商报*, 2024-12-02(A06).  
Yang G. The first domestic offshore comprehensive energy island innovation platform has officially launched [N]. *Electromechanical Business Daily*, 2024-12-02(A06).
- [31] 吴欢州. 江苏如东海域东太阳沙综合能源岛开发 [J]. *中国港口*, 2025 (3): 49–52.  
Wu H Z. Development of east Taiyangsha comprehensive energy island in Rudong Sea area, Jiangsu Province [J]. *China Ports*, 2025 (3): 49–52.
- [32] Douvere F. The importance of marine spatial planning in advancing ecosystem-based sea use management [J]. *Marine Policy*, 2008, 32(5): 762–771.
- [33] Xia J J, Zou G. Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: A review [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 268: 113322.
- [34] 叶平. 服务“四方五港”为海岛经济发展提供强劲支撑 [J]. *港口经济*, 2017 (2): 60–61.  
Ye P. Serving the “four directions and five ports” provides strong support for the island’s economic development [J]. *Port Economy*, 2017 (2): 60–61.
- [35] 胡莉, 刘玲, 何一鑫. 海南省“四方五港”的发展现状及问题分析 [J]. *国际公关*, 2025 (10): 95–97.  
Hu L, Liu L, He Y X. Development status and problems analysis of “four sides and five ports” in Hainan Province [J]. *PR Magazine*, 2025 (10): 95–97.
- [36] 海南日报. 三亚崖州湾科技城高新区: “蓝色经济”动能澎湃 [EB/OL]. (2025-06-08)[2026-01-29]. <https://reportify.cn/news/1129007327119282176>.  
Hainan Daily. “Blue economy” momentum booms in Sanya Yaqiongwan science and technology city high-tech zone [EB/OL]. (2025-06-08)[2026-01-29]. <https://reportify.cn/news/1129007327119282176>.
- [37] 中国电信开通三沙5G基站 永兴岛实现“双千兆” [J]. *电信工程技术*与标准化, 2019, 32(8): 29.  
China Telecom opens Sansha 5G base station Yongxing island to realize “double gigabit” [J]. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 2019, 32(8): 29.
- [38] 黎明. 中国南海·永兴岛 [J]. *新东方*, 2012 (3): 82.  
Li M. China Nanhai Yongxing island [J]. *The New Orient*, 2012 (3): 82.
- [39] 张增湘. 三沙市永兴社区建设与治理问题研究 [D]. 海口: 海南大学(硕士学位论文), 2018.  
Zhang Z X. Research on the construction and governance of yongxing community in Sansha City [D]. Haikou: Hainan University (Master’s thesis), 2018.
- [40] 周桂银. 中国南沙岛礁建设的战略战术博弈 [J]. *世界经济与政治论坛*, 2017 (4): 48–63.  
Zhou G Y. Strategic and tactical game of Nansha Island reef construction in China [J]. *Forum of World Economics & Politics*, 2017 (4): 48–63.
- [41] Huang L L, Tan Y, Guan X. Hub-and-spoke network design for container shipping considering disruption and congestion in the post COVID-19 era [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2022, 225: 106230.
- [42] Tiong A, Vergara H A. Evaluation of network expansion decisions for resilient interdependent critical infrastructures with different topologies [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2023, 42: 100623.
- [43] 杜宝库, 熊伟, 度红望, 等. 南海海难救援中救助飞机的优选研究 [J]. *中国航海*, 2022, 45(2): 128–133.  
Du B K, Xiong W, Du H W, et al. Selection of rescue airplane for shipwreck within South China Sea [J]. *Navigation of China*, 2022, 45(2): 128–133.
- [44] 自然资源部. 自然资源部关于探索推进海域立体分层设权工作的通知 [EB/OL]. (2023-11-13)[2026-01-29]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content\\_6916283.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916283.htm).  
Ministry of Natural Resources. Notice from the Ministry of Natural Resources on exploring and promoting the establishment of rights in marine areas through three-dimensional layered systems [EB/OL]. (2023-11-13)[2026-01-29]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content\\_6916283.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916283.htm).
- [45] 厦门市自然资源和规划局. 厦门市海域使用权立体分层设权宗海界定技术规范 [EB/OL]. (2024-12-31)[2026-01-29]. <https://zygh.xm.gov.cn/zfxxgk/zfxxgkml/zhxx/tzgg/202501/P020250103662739609961.pdf>.  
Xiamen Municipal Bureau of Natural Resources and Planning. Technical specifications for three-dimensional layered establishment of sea area use rights and boundary definition of zhihai [EB/OL]. (2024-12-31)[2026-01-29]. <https://zygh.xm.gov.cn/zfxxgk/zfxxgkml/zhxx/tzgg/202501/P020250103662739609961.pdf>.
- [46] van den Burg S W K, Skirtun M, van der Valk O, et al. Monitoring and evaluation of maritime spatial planning—A review of accumulated practices and guidance for future action [J]. *Marine Policy*, 2023, 150: 105529.
- [47] 福建省图书馆. 决策参考资料 202605·专题资料汇编: 飞地经济模式分析与发展建议 [EB/OL]. (2026-01-20)[2026-01-29]. [http://fjlib.net/zt/fjstsgjcx/zbzl/rdzt/202601/t20260120\\_479763.htm](http://fjlib.net/zt/fjstsgjcx/zbzl/rdzt/202601/t20260120_479763.htm).  
Fujian Provincial Library. Decision-making reference materials 202605: Analysis and development suggestions for the enclave economy model [EB/OL]. (2026-01-20)[2026-01-29]. [http://fjlib.net/zt/fjstsgjcx/zbzl/rdzt/202601/t20260120\\_479763.htm](http://fjlib.net/zt/fjstsgjcx/zbzl/rdzt/202601/t20260120_479763.htm).
- [48] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国土资源部, 环境保护部, 等. 关于支持“飞地经济”发展的指导意见(发改地区〔2017〕922号) [EB/OL]. (2017-05-12)[2026-01-29]. [https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201706/t20170602\\_1050606\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201706/t20170602_1050606_ext.html).  
National Development and Reform Commission, Ministry of Land and Resources, Ministry of Environmental Protection, et al. Guidelines on supporting the development of “special economic zones” [EB/OL]. (2017-05-12)[2026-01-29]. [https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201706/t20170602\\_1050606\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201706/t20170602_1050606_ext.html).
- [49] 范诗玥. 南海岛礁军地协同应急保障机制现状、制约因素及对策分析 [R]. 三亚: 中国海洋学会2019海洋学术(国际)双年会, 2019.  
Fan S Y. Analysis of the current situation, constraints, and countermeasures of military-civilian integration on south china sea islands and reefs [R]. Sanya: The 2019 China Ocean Society Marine

Academic (International) Biennial Conference, 2019.