

海洋地热资源开发潜力方向与关键技术体系发展研究

宋荣彩^{1,2}, 多吉^{2*}, 王众², 梁元², 董树义², 刘清友²

(1. 成都理工大学能源学院, 成都 610500; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059)

摘要: 本文立足我国海洋地热资源禀赋, 系统分析了浅层、中深层及高温热液资源的开发潜力, 重点探讨关键技术体系、发展瓶颈及其经济性约束。在此基础上, 构建了分区域、分阶段的发展路径: 在南海深海区优先开展高温热液资源示范开发, 在东部沿海区推广中低温资源梯级利用, 在深远海区面向干热岩及矿热协同利用开展前瞻研究。进一步提出我国海洋特色“地热+”多能协同开发模式, 涵盖油气井改造利用、“风光热”互补、“热-电-水”联产及在特定高矿化流体条件下的“热-电-矿”耦合利用, 并系统梳理技术攻关、装备提升、政策激励、产业协同和生态安全等保障体系, 旨在为我国海洋地热资源由潜力评价走向示范应用提供更加严谨、可实施的科学依据与技术支撑。

关键词: 海洋地热; 资源潜力评价; 协同开发; 关键技术体系; 因地制宜

中图分类号: P741 **文献标识码:** A

Potential Directions and Key Technology System for Marine Geothermal Resource Development

Song Rongcai^{1,2}, Duo Ji^{2*}, Wang Zhong², Liang Yuan², Dong Shuyi², Liu Qingyou²

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, China)

Abstract: Based on China's marine geothermal resource endowment, this study evaluates the development potentials of shallow, medium-to-deep, and high-temperature hydrothermal resources, with a focus on key technological systems, development bottlenecks, and economic constraints. On this basis, a region-specific and phased development pathway is proposed: priority demonstration of high-temperature hydrothermal utilization in the deep water of the South China Sea, cascading use of medium- and low-temperature resources in the eastern coastal zone, and forward-looking research on enhanced geothermal systems and possible mineral-geothermal coupling in far-offshore areas. The study further proposes a distinctive marine "Geothermal-plus" multi-energy synergistic development model, involving retrofitting of offshore oil and gas wells, wind-solar-geothermal hybrid systems, heat-electricity-water cogeneration, and heat-electricity-mineral coupling under suitable high-mineralization conditions. A strategic support framework is also outlined, covering technological innovation, equipment capability enhancement, policy incentives, industrial coordination, and ecological risk control. The study aims to provide a more prudent and operational scientific basis and technological support for advancing China's marine geothermal sector from resource assessment to demonstration-scale deployment.

Keywords: marine geothermal energy; resource potential assessment; collaborative development; key technology system; adaptation to local conditions

收稿日期: 2026-03-10; 修回日期: 2026-04-22

通讯作者: *多吉, 油气藏地质及开发工程国家重点实验室教授, 中国工程院院士, 研究方向为地热勘察; E-mail: bmwb@vip.163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“海上能源一体化协同开发战略研究”(2025-HZ-30)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

一、前言

地热能是一种稳定、连续、清洁的可再生能源，可在电力系统中承担基础负荷，其平均年运行时间超过7350 h，全年约82%的时间可持续运转，这一利用率显著高于太阳能光伏、光热和风能^[1]。海洋地热能作为地热资源的重要组成部分，其战略价值尤为突出：海洋覆盖地球表面约71%，洋壳厚度通常约为5~10 km，显著薄于大陆地壳，且大洋区域平均热流总体高于大陆区域，表明其具有重要的资源潜力^[2]。发展海洋地热可为近海城市供暖、海岛供电及深远海油气、天然气水合物和海洋工程活动提供稳定的清洁能源，减少对化石能源的依赖，服务“双碳”目标，并带动深海装备制造和海洋工程产业发展。

陆地矿产与地热资源共采的实践为海洋开发提供了借鉴。陆地深部矿产开采与地热协同模式有效解决高温热害问题，实现梯级利用和资源价值最大化。我国深部矿山已有的井巷设施和岩层内部蕴含的丰富热量，为地热利用提供了有利条件^[3]。20世纪70年代，学者即提出将矿山地热作为独立研究方向，并将其与井下热害治理结合。目前，煤矿、金属矿和油气开采深度已分别超过1500 m、4350 m和7500 m，其中蕴含的高温地热资源具有巨大的发展潜力^[4]。

与陆地地热开发相比，海洋地热资源开发面临更强的场景约束和更高的准入条件，其发展路径不能简单沿用大陆地热的开发思路，而应立足海洋环境特征、资源赋存条件和用能需求开展差异化研究。现有研究表明，海洋地热资源开发的难点不仅在于热源是否存在，更在于海底热异常识别与热储评价的不确定性、深水钻完井与井筒长期完整性的保障、高盐高湿环境下关键装备的腐蚀结垢控制、海上平台和岛礁场景下热电负荷规模受限、深远海条件下运维与回灌体系复杂以及生态环境影响和项目经济性的综合约束^[5,6]。相比之下，陆地地热、油气井地热利用及矿山热能回收等实践更多只能为海洋地热提供方法层面的启发，而难以直接构成可复制的发展模式。基于此，海洋地热资源开发研究应从“资源潜力论证”进一步转向“开发条件识别-适用场景匹配-关键技术筛选-差异化路径构建”的分析框架，重点回答不同海域适合开发什么类型资源、服务哪

些能源需求、依赖哪些关键技术以及在何种边界条件下具备工程可行性。只有在充分认识海洋地热资源开发核心问题和技术难点的基础上，才能进一步提出符合我国海域特点的因地制宜发展路径^[7]。

在此背景下，本文系统梳理国内外海洋地热的发展现状，并借鉴陆地油气井改造利用、矿山余热利用及高矿化地热卤水综合利用等经验，科学评价我国海洋地热潜力、分析关键技术瓶颈与经济性约束，提出符合国情、因地制宜的发展战略与实施路径，已成为亟需解决的重要课题。这不仅有助于推动我国海洋地热产业高质量发展，也为探索“地热+”多能协同开发提供更具可操作性的理论基础和实践参考。

二、海洋地热资源潜力评价与勘探进展

（一）资源潜力评价

我国拥有广袤的海域和复杂的地质构造，海洋地热资源禀赋十分优越。根据现有海洋油气勘探资料的初步测算，仅在近海的渤海湾盆地、珠江口盆地、北部湾盆地和莺琼盆地这四大盆地中，浅层水热型海洋地热能的资源量就极为可观。相关测算数据显示，其总地热资源量高达 8.676×10^{21} J，折合标准煤约 2.963×10^{11} t^[7]。若能实现有效开发，其潜在的二氧化碳减排量可达 7.885×10^{11} t。即使仅开采其中的1%，也能贡献约 7.885×10^9 t的碳减排量，相当于我国2022年碳排放总量的65%左右，展现出巨大的减碳潜力和环境效益^[8,9]。

从资源类型来看，我国海洋地热资源主要可分为两大类。第一类是浅层海洋地热能资源，主要分布在海岸线附近，埋藏深度较浅，通常在1~50 m，在近海及浅海的板块边界大陆架区域较为常见。我国南海北部海岸带、渤海湾等区域具备开发潜力，其中南海莺歌海盆地已探明浅层中低温地热系统，其热储构造与沉积盆地耦合特征为典型代表；意大利的萨利纳岛地热田亦属此类。这类资源温度相对较低，主要适用于供暖、制冷、养殖、旅游、温泉开发等直接利用领域，其中旅游、温泉开发是重要的应用方向，如珠海的海洋温泉度假区海泉湾即利用近海地热资源打造综合旅游服务。第二类是深部海洋地热能资源，主要赋存于板块构造活跃的扩张带或俯冲带，埋藏深度大，通常在海平面以下

1000~4000 m, 热液温度极高, 可达100~600 °C。这类资源能量密度大, 主要适用于发电。在我国, 南海北部陆坡、东海冲绳海槽等区域是高温热液型资源的富集区, 具有极高的发电开发价值; 而渤海湾、东南沿海近海等区域则以中低温资源为主, 更适合进行梯级利用。

结合海洋矿产资源的分布特征, 我国海洋地热资源与海洋矿产活动在部分海域具有一定的空间耦合关系, 值得开展协同利用研究。但需要指出的是, 从“空间邻近”到“工程共采”仍存在明显的技术跨越。在渤海湾盆地、珠江口盆地等近海区域, 现有海上油气井、平台设施和地质资料可优先服务于地热资源评价与油气井改造利用, 这是当前可行性相对较高的协同路径。相比之下, 深海矿产开发区的矿产-地热一体化开发还需同时满足高温或高矿化流体稳定赋存、可控腐蚀与结垢、封闭回灌以及环境风险可控等条件, 现阶段更适合作为前瞻研究和示范方向。

(二) 勘探进展

国际上, 海洋地热资源的勘探研究起步较早, 主要集中在环太平洋、大西洋中脊等板块边缘的高温热液活动区。其勘探技术体系相对成熟, 综合运用了地球物理、地球化学和深海探测等多种手段。在地球物理勘探方面, 广泛采用海洋可控源电磁勘探(MCSEM)技术来精准识别高电阻率的热储层分布; 利用海底高分辨率地震勘探来刻画储层的精细构造和裂隙发育特征; 通过热流探针进行原位测量, 以获取海底不同深度的精确温度场数据。在地球化学勘探方面, 则通过检测海水的浊度、温度异常以及Mn、Fe、Cu等微量元素的浓度异常, 来快速圈定海底热液喷口的位置; 并通过遥控潜水器(ROV)等设备进行海底热液流体的直接取样, 以分析其化学成分, 进而识别资源类型与品质。此外, 自主水下航行器(AUV)、ROV等先进的深海探测装备, 搭载高精度传感器, 能够实现海底地形地貌及热液活动区的高精度、全覆盖勘测。意大利的马西利项目、墨西哥湾的热泉勘探以及东太平洋海隆的多个热液区调查, 都是国际上深海地热勘探的成功范例^[10]。

在海洋矿产与地热资源协同勘探方面, 部分国家已开展初步探索, 但现阶段更接近工程实践的是

“油气设施改造+地热利用”而非严格意义上的“矿产与地热共采”。例如, 北海部分项目依托现有油气井资料 and 平台设施开展地热评估与改造试验, 利用既有井筒、测井和温压资料降低勘探成本与风险。该类实践说明: 海洋地热与既有海洋工程设施协同开发具有现实基础, 但对于深海矿产区的矿热联产, 仍需在储层认识、工艺耦合与环境评价方面进一步验证。

我国的海洋地热勘探工作正处于从基础研究向应用探索过渡的关键阶段。目前, 我国尚未开展专门的、系统性的海洋地热资源调查, 主要是利用已有的海洋油气勘探数据和区域地质调查资料, 对部分海域的地热异常进行初步的识别和潜力评估。在南海、东海等重点海域, 我国科研人员已系统开展了地球物理、地球化学及热流值的综合调查研究, 例如, 通过多道地震反射剖面识别了潜在的热储构造, 通过海水化学分析发现了局部的热液异常线索, 对区域地热背景场有了初步的认识^[11-14]。

在海洋矿产与地热资源协同勘探技术研发方面, 我国仍处于起步阶段^[11,15]。借鉴陆地矿山地热、油气井改造利用和高矿化地热系统综合开发经验, 我国需要进一步整合海洋油气、矿产勘探与地热勘探数据, 建立多源数据融合的勘探技术体系。目前, 我国在海洋可控源电磁勘探、海底高分辨率地震勘探等方面已具备一定基础, 但在深海热储识别、流体运移刻画和资源-环境耦合评价方面仍需持续优化^[16,17]。

总体而言, 我国在海洋地热勘探领域仍存在明显短板^[18]: 一是缺乏针对深海环境的高精度、专用化勘探技术和装备, 核心传感器依赖进口; 二是资源评价技术相对落后, 多源数据融合与三维地质建模能力不足, 难以实现对储层参数的动态定量评价; 三是对南海等深远海区域高温热液资源和深层干热岩资源的勘探广度与深度不足, 资源情况仍没有厘清; 四是海洋矿产与地热协同开发的勘探理论和方法尚处于探索阶段, 缺乏成熟的技术路线、评价标准和环境约束框架^[19]。

三、海洋地热资源开发关键技术体系构建

(一) 钻完井核心技术

海洋地热资源开发的钻完井作业面临着比陆地

更为严苛的技术挑战，主要包括高温高压的极端工况、海水的强腐蚀性、复杂的海底地形与地质构造以及精确的井轨迹控制需求。因此，必须构建一套适应海洋环境的专用钻完井技术体系。意大利马西利项目采用深水钻井平台和高温耐腐井控装置，为深海超临界地热开发提供了技术参考^[2]。

在钻井液与完井液方面，关键是研发能够长期稳定工作于高温、高压和高盐环境下的抗高温、抗高压、抗盐污染流体体系。这类钻井液需要具备良好的流变性能、滤失控制能力和润滑性能，以确保钻井过程安全高效。对于完井液，则需重点考虑其与储层的配伍性，防止对热储层造成损害^[20]，并有效支撑井壁、保证井身长期完整性。借鉴陆地深部高盐卤水或高矿化地热系统的经验，海洋钻完井液研发可充分考虑流体矿化度、析盐结垢与材料腐蚀等特征，优化配方设计，降低对储层和井筒的二次伤害。

在钻具与完井工具方面，耐温耐腐是核心要求。需要研发和应用如镍基合金套管、陶瓷涂层钻杆等高性能材料，以显著提升钻具和井筒在高温、高压、高盐环境下的使用寿命，目标是将井身寿命提升至20年以上。同时，为了提高热储层的接触面积和热能提取效率，需要发展先进的井轨迹控制技术，如大位移水平井、U型对接井、多分支井等复杂结构井的钻井技术，实现对目标储层的高效穿透和立体开发。在陆地盐矿开采中成熟应用的水平对接井技术，可为海洋钻完井技术提供参考，通过优化井眼轨迹设计，提高钻井效率和储层连通性。

针对海洋矿产与地热资源协同利用的特殊需求，钻完井技术还需要进行针对性创新。例如，在海洋油气田区域开展地热开发时，可利用现有油气井的井身结构和井眼轨迹数据，优化地热井部署方案，实现低成本改造与利用。对于矿热协同场景，则应强调“条件适配、分步推进”的原则，只有在井筒完整性、流体温度与流量、矿化特征以及环境约束均满足要求时，才适宜布置热-矿耦合开发井型和完井结构。

此外，创新开发模式也是降低成本的重要途径。例如，利用退役或已开发的海上油气井井筒进行地热改造，即“油气+地热”融合开发模式。该模式能够利用既有平台、井口和部分海底管线，理论上有助于降低前期勘探和钻井投入；但其实际降

本幅度取决于井筒完整性、“温度-流量”条件、平台剩余寿命及改造范围，因此需开展逐井评价和全生命周期经济测算后方可实施。

(二) 热能高效转换与利用技术

根据海洋地热资源温度的不同，需要匹配不同的热能高效转换与利用技术，以实现能量的梯级利用和最大化收益。地热发电主流技术主要包括干蒸汽、闪蒸和二元循环三类。考虑到海洋地热资源类型复杂，且部分场景下面临流体腐蚀、结垢及中低温利用等问题，本文重点讨论二元循环中的有机朗肯循环（ORC）技术。这并不意味着ORC是地热发电的唯一主流方式，而是因为其在海洋中低温地热资源及复杂流体条件下具有较好的适用性。

对于温度在150℃以上的高温热液资源，发电是其最主要的利用方式。目前主流的技术是闭式循环发电系统，该系统通过低沸点的有机工质（如异丁烷、丙烷等）作为中间传热介质，在蒸发器中被地热流体加热至气态，驱动汽轮机旋转并带动发电机发电，做功后的工质在冷凝器中被冷却为液态，再通过循环泵送回蒸发器，完成一个发电循环。闭式循环系统的优势在于避免了地热流体对汽轮机的直接腐蚀和结垢，且在中低温条件下仍能保持较高的发电效率。针对海洋环境，还需要对涡轮发电机、冷凝器等关键设备进行抗风浪、抗腐蚀的特殊设计，以确保其在复杂海况下的稳定运行。

借鉴陆地高温富锂卤水矿与地热资源综合利用经验，对于海洋中高温且高矿化的地热流体，可探索在发电或供热的同时提取其中的锂、钾、硼等伴生资源，形成“能源+矿产”的耦合利用路径（见图1）。但需要强调，该模式能否成立高度依赖流体化学组成、元素品位、结垢与腐蚀控制、分离回收效率以及尾液回灌与环保约束。目前国际上较成熟的案例主要来自陆上高矿化地热卤水综合利用，海洋场景整体仍处于技术验证和示范研究阶段。

对于温度在150℃以下的中低温地热资源，除了可以采用ORC进行发电外，更适合进行直接利用或综合利用^[21,22]（见图2）。例如，利用地源热泵技术，将低位热能提升为高位热能，用于近海城市的供暖和制冷，或为海水养殖提供稳定的水温环境。另一个极具潜力的方向是地热与海水淡化的耦

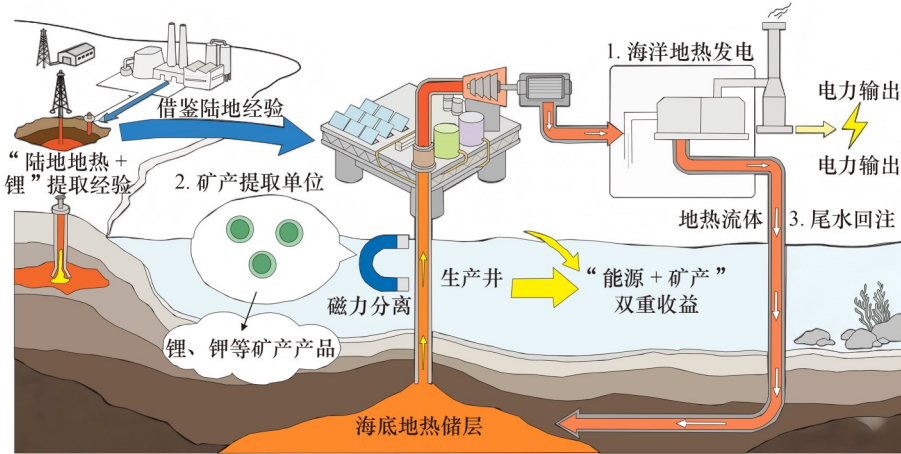


图1 海洋高温富矿化地热流体“能源+矿产”综合开发

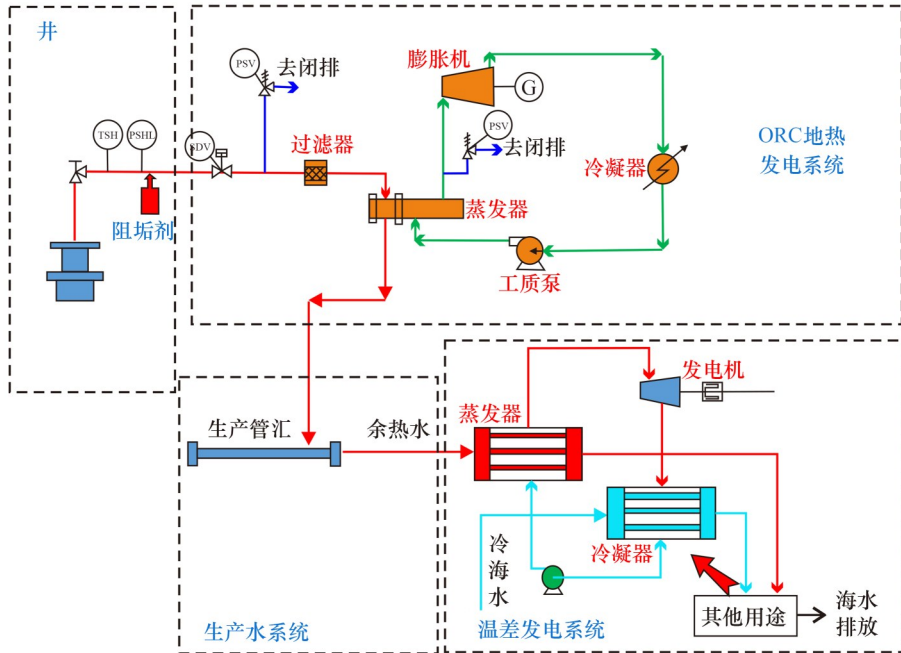


图2 中低温地热能发电示意图

注：TSH为储热器；PSHL为低压加热器；SDV为排液安全阀；PSV为泄压安全阀；G为发电机。

合利用。通过地热蒸汽的热能直接加热海水，或驱动反渗透海水淡化装置，可以在生产电力或热能的同时，产出高品质的淡水，有效解决沿海地区和海岛的淡水短缺问题，实现能源与水资源的协同保障^[23,24]。

在海洋矿产与地热资源共采的热能利用方面，可根据矿产开采的能源需求，实现热能的梯级利用。例如，在深海油气开采平台，地热发电可满足平台的电力需求，发电后的余热可用于原油加热、生活供暖等；在深海矿产开采区域，地热资源可用

于采矿设备的降温、开采场地的供暖以及矿物加工过程中的热能供应，实现能源的高效循环利用^[25,26]。

此外，多能互补系统的构建也是未来的发展趋势。例如，将海洋地热电站与海上风电场、光伏电站相结合，构建“地热+风电+光伏”的多能互补微电网系统（见图3）。地热的稳定性可以有效平抑风电和光伏的间歇性与波动性，提升整个供电系统的可靠性和稳定性，同时降低对储能系统的依赖，优化综合能源成本^[27,28]。对于海洋矿产开采区域，这种多能互补系统可以为采矿活动提供稳定、可靠的

能源保障，减少对化石能源的依赖，降低开采成本和碳排放量。

（三）长效运维与安全防控技术

海洋环境的高盐、高湿、强腐蚀以及海洋生物附着等特性，对海洋地热系统的长期安全运行和维护提出了极高的要求，必须建立一套完善的长效运维与安全防控技术体系^[29]。

防腐防垢与防生物附着技术是保障系统长期稳定运行的基础。在材料层面，需要研发和应用具有优异耐蚀性能的海洋级防腐材料，如高性能合金、陶瓷涂层、有机涂层等^[30,31]。在技术层面，可以采用阴极保护、电化学防腐等主动防护措施。针对生物附着问题，除防污涂料外，还可探索仿生防污、物理防污（如超声波、低表面能材料）等绿色技术，以减少对海洋生态环境的影响^[26,32]。陆地深部高盐卤水或高矿化地热系统中的防腐防垢经验，可为海洋地热资源开发提供参考，但必须结合海水环境、海洋生物附着和长期海上运维条件进行再设计与再验证。

智能监测与诊断技术是实现精细化运维的关键。应构建一个集井下参数（温度、压力、流量）监测、海底设备状态监测、海洋环境（海流、波浪、温度）监测于一体的综合监测网络。通过在关键部位部署传感器，并利用海底观测网和卫星通信技术，将实时数据传输至云端大数据平台。基于人工智能和大数据分析技术，对采集的数据进行深度挖掘，实现对储层状态变化、设备运行异常的实时预警和故障诊断，变“被动维修”为“主动维护”，显著提升运维效率和系统的安全性^[33,34]。借鉴陆地矿产与地热共采的智能监测经验，海洋地热系统的

监测应注重多参数、实时化、智能化，确保运维决策的科学性和及时性。

在海洋矿产与地热资源共采的运维方面，需要建立协同运维机制，统筹考虑矿产开采与地热开发的设备维护和安全防控。例如，共享监测网络和运维平台，实现数据互通、资源共享，提高运维效率；制定协同应急预案，针对可能出现的安全事故，如井漏、设备故障、生态污染等，采取统一的应急响应措施，最大限度降低损失^[35,36]。

生态安全防控技术是实现绿色开发的保障。海洋地热资源开发可能会对局部海洋生态系统产生影响，如热污染、化学物质排放、噪声干扰等。因此，必须建立严格的环境影响评价体系，在项目规划阶段就充分评估其潜在的生态风险。在开发过程中，应采用尾水回灌技术，将换热后的地热尾水重新注入地下储层，以减少海水排放带来的环境影响，并维持热储层的压力稳定^[37,38]。同时，需要制定完善的深海环境风险应急预案，并研发生态修复技术，一旦发生意外，能够迅速采取措施，将对海洋生态的影响降至最低。

对于海洋矿产与地热资源共采项目，生态安全防控技术需要更加严格和全面。矿产开采与地热开发的叠加可能会对海洋生态产生更大的影响，因此需要进行更深入的生态影响评价，制定针对性的防控措施^[39,40]。例如，在钻井过程中，采用环保型钻井液，减少对海水和海底沉积物的污染；在矿产与地热流体提取过程中，优化工艺参数，避免过度开采导致的海底地质环境变化；在尾水处理方面，采用先进的净化技术，确保排放或回灌的流体符合环保标准。

四、因地制宜的海洋地热能发展策略与路径

（一）分区域发展策略

面向深远海场景，海洋地热的发展不宜局限于单一资源开发思路，而应体现“地热+”理念，将地热与风电、光伏、海洋能及储能系统进行统筹配置。其原因在于，深远海能源需求通常具有负荷独立、连续性要求高、外部补给困难等特点，单一可再生能源难以同时满足稳定性与经济性要求。相比之下，地热在综合能源系统中更适合作为稳定底座能源，与波动性能源及储能系统形成互补，从而提

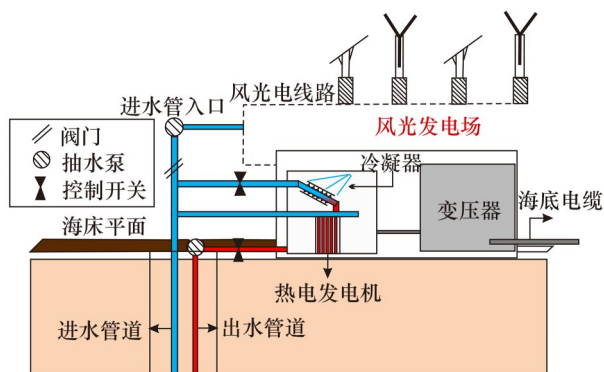


图3 “风光热”一体利用示意图

升深远海场景下能源供应的安全性、灵活性和综合利用效率。

南海战略区是我国高温热液型海洋地热资源的重要富集区，资源潜力大，同时也是我国海洋权益和资源开发的战略要地。发展策略应以高温热液资源调查评价和示范开发为核心，优先在南海北部陆坡等地质条件相对成熟、资源条件较优的区域，部署若干示范性工程，为岛礁供能、海水淡化和海上工程活动提供稳定能源^[41,42]。在与油气设施协同方面，可结合已开发油气田探索平台能源替代与余热利用；至于深海矿产资源开发区的矿热联产，则宜作为前瞻研究方向，重点开展资源匹配、环境风险和工艺可行性验证。

东部沿海区经济发达，能源需求旺盛，且拥有丰富的中低温地热资源和一定数量具备改造潜力的海上油气井。发展策略应聚焦中低温地热资源的直接利用和梯级利用，重点推进近海城市供暖、工业用热、海水养殖和休闲康养等项目示范。同时，稳步推进“油气+地热”融合开发，形成若干“近海清洁供能带”，为区域能源转型和实现“双碳”目标提供支撑^[43]。对于与矿产活动空间接近的区域，可结合实际能源需求开展供热、设备冷却等协同利用研究，但不宜直接推演为成熟商业化共采模式。

深远海战略储备区主要指除南海重点示范区以外的其他深远海区域，这些区域可能蕴藏干热岩（EGS）资源，部分区域也可能与深海矿产活动空间叠置。由于开发技术难度大、投资成本高、周期长，现阶段应将其作为战略储备资源进行布局。重点开展资源调查、储层改造、高效热能提取和环境约束研究，并同步推进矿热协同利用的前瞻性论证，为2035年后的规模化开发储备技术和资源基础^[44,45]。

（二）分阶段实施路径

海洋地热产业的发展是一个长期的系统工程，需要遵循技术发展规律和产业成长周期，分阶段、有重点地推进（见表1）。同时，在每个阶段都应注重海洋矿产与地热资源共采技术的研发与示范，逐步实现共采模式的规模化应用。

近期（2026—2030年）：示范验证阶段。这一阶段的核心目标是完成全国海洋地热资源的初步详查，基本摸清我国近海及重点海域的地热资源分布与潜力，构建国家级海洋地热资源数据库。同时，开展海洋矿产与地热资源协同利用潜力的专项调查，明确适宜场景与约束条件。在技术层面，重点突破高温钻完井、高效换热、防腐防污等核心技术和关键装备，形成10兆瓦级以下示范系统能力。针对协同利用，重点研发适应海洋环境的井筒改造、热能综合利用、监测与运维等技术，优先选择1~2个具备现实基础的海上油气设施开展示范，而对矿热联产则以概念验证和中试研究为主。

中期（2031—2035年）：商业化推广阶段。这一阶段的核心目标是完善海洋地热资源开发利用的技术标准、规范和政策体系，推动海洋地热项目从示范工程向商业化项目转变。同时，逐步建立海洋矿产与地热资源协同利用的技术标准和评价方法。在技术层面，实现更大规模海洋地热发电系统的集成与优化，持续降低开发成本，使近海优势场景下的海洋地热项目具备更强的市场竞争力。在产业层面，形成“地热+风电+海水淡化”等多种多能互补模式；对于协同利用，则优先推动海上油气设施改造利用和高矿化流体综合利用等成熟度较高的场景扩展。

远期（2036—2050年）：规模化发展阶段。这一阶段的核心目标是构建具有国际竞争力的海洋地

表1 海洋地热产业分阶段实施路径

实施阶段	核心目标	资源勘查	工程与产业布局
示范验证阶段	完成资源详查与技术示范，积累工程经验，核心技术成熟度≥7级	完成全国海洋地热资源初步详查，构建国家级资源数据库；开展共采潜力专项调查	南海、渤海湾建成5~8座示范工程；落地1~2个共采示范项目
商业化推广阶段	完善标准和政策体系，实现商业化转型，形成规模化产业集群	全域资源精细化勘查，划定规模化开发区块	打造多能互补产业模式，培育龙头企业；覆盖南海岛礁与东部沿海城市群
规模化发展阶段	建成千亿级产业体系，成为能源体系重要支柱，共采模式主流化	深远海干热岩资源全域勘探，实现资源全覆盖评估	全领域多场景应用，支撑海洋强国、能源强国建设

热产业体系，使海洋地热成为我国新型能源体系的重要补充。届时，若深远海钻完井、储层改造、防腐材料、环境风险控制以及经济性条件均获得验证，可择优推进深远海干热岩和矿热协同利用的规模化部署。在应用层面，海洋地热将广泛服务于发电、供暖、供冷、海水淡化、海上平台供能等领域，并在成熟条件下向深海采矿、海上数据中心等新兴场景延伸。

（三）差异化发展模式

根据不同区域的资源禀赋、开发条件和市场需求，结合海洋矿产活动和基础设施分布，构建差异化的海洋地热发展模式。其中，“矿热协同”应作为受资源条件、经济性和环保约束共同支配的特色模式进行审慎推进。从近期可实现的应用需求看，海洋地热更适合优先服务于岛礁驻守、海洋观测、海上油气及矿产平台等对能源连续性和供能安全要求较高的场景，其开发目标应首先定位于稳定供能和综合能源保障，而非单纯追求发电装机规模。

岛礁保障模式：适配南海偏远岛礁，建设小型化、模块化地热微电网，保障供电、淡水供应，替代柴油发电，降低运维成本。对于岛礁周边存在海洋矿产资源的区域，可探索“岛礁能源保障+矿产开发+地热利用”的一体化模式，地热资源不仅满足岛礁的能源需求，还为周边矿产开采提供能源支持，实现岛礁、矿产、地热资源的协同发展。

近海融合模式：依托海上油气田，开展“地热+油气”联合开发，提升油气田能源利用效率，降低开发碳排放量^[4]。借鉴陆地油气田地热综合利用的“雄县模式”，在海洋油气田区域建设地热供暖、发电系统，满足油气开采平台的能源需求，同时为周边沿海城市提供清洁能源。对于近海其他矿产资源开发区，如滨海砂矿、近海油气田伴生矿产等，采用“矿产开采+地热提取+热能梯级利用”的模式，实现矿产与地热资源的综合开发和高效利用。

深远海示范模式：聚焦南海北部陆坡等重点海域，围绕岛礁、海洋观测网、海上油气平台及矿产平台的综合能源需求，建设以地热为稳定供能基础、以风电和光伏为补充、结合海洋能与储能系统的多能协同示范工程。与单一能源系统相比，该模式能够更好适应深远海负荷波动大、外部补给困难

和运维窗口受限等特点。其中，地热资源主要承担连续供能和系统稳定支撑功能，风光资源用于降低系统整体化石能源依赖，海洋能可依据具体海域条件作为补充能源接入，储能则提升系统调峰和应急保障能力。在此基础上，可进一步与海水淡化、平台用热、冷链保障及氢能制备等用能环节协同配置，逐步验证深远海多能综合利用模式的技术可行性与经济性^[46,47]。

结合深远海多能互补系统，构建“地热+风电+光伏+储能”的综合能源供应体系，为深远海工程活动提供稳定、可靠的能源保障。基于此战略构想，本文综合上述发展模式提出了适应我国海域特点的海洋地热协同开发模式（见图4）。该模式强调地热能与油气生产设施、风光发电、海水淡化及在适宜条件下的伴生资源提取之间的系统耦合，但各子模式需根据资源品位、技术成熟度和经济性条件分层推进。

在我国高温高压地热资源富集区，可优先利用现有油气平台进行改造，实施小型化、集成化地热发电^[34]。针对井口温度普遍低于150℃的特点，ORC是适宜的技术选择。通过在现有平台部署ORC发电机组，将采出地热水中的热量转化为电能，可显著降低独立开发的高昂成本。同时，经ORC发电后的尾水温度仍可达80℃左右，这部分余热可进一步驱动温差发电或用于低温多效海水淡化，实现能量的梯级利用，大幅提升系统整体的能源利用效率^[35,36]。此外，在拥有充足日照和风能资源的海域，可构建基于风电、光伏、地热结合的“风光热”一体式利用方案。

在平台上集成风力涡轮机和光伏系统，与地热ORC发电系统通过智能微网进行耦合。可再生能源电力可用于平台日常运行，或驱动水泵向储层注水以强化地热开采。地热能则以其稳定性弥补风光资源的间歇性，形成稳定、可靠的联合电力输出，这对于远离大陆的深海油气平台或岛礁的能源供应具有重要意义。对于那些位于高热流区但尚无开发平台的区域，可探索海洋地热能原位发电技术。该方案将小型化地热发电装置直接置于海底，利用海底管道将所发电力输送至附近平台或岛礁。尽管目前该技术仍面临海洋环境恶劣、设备可靠性要求高等挑战，处于理论设计与试验阶段，但其一旦取得突破，将极大地拓展海洋地热能的开发边界。

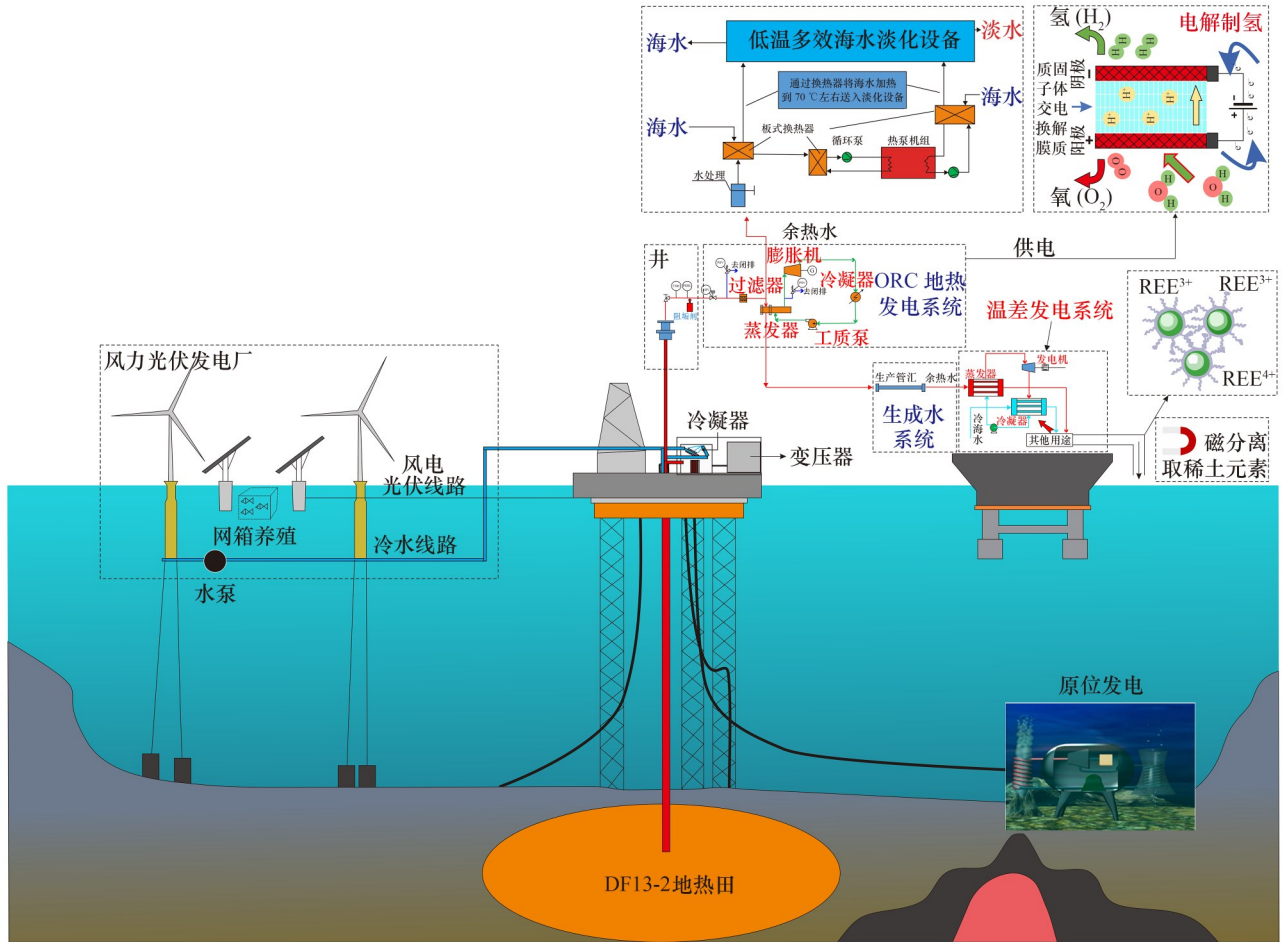


图4 海洋地热协同开发模式图

基于地热流体中可能富集多种伴生资源的特性，协同开发模式还可向矿产提取和海水淡化等领域延伸。部分高矿化地热流体中可能含有锂、硼、氦等伴生组分，但其是否具备回收价值，取决于元素浓度、分离能耗、设备腐蚀结垢、回灌处理和生态约束等因素。因此，矿物提取更适宜作为高矿化流体综合利用的备选模块，而非所有海洋地热项目的通用配置。相比之下，利用 70~90 °C 尾水开展低温多效淡化，或利用更高温资源先发电再驱动反渗透淡化，在技术路径上更接近近期可落地场景。

综上所述，我国海洋地热协同开发并非单一技术路线的选择，而是一个基于资源分级、空间优化、技术成熟度和经济性约束的多路径、多层次系统工程。通过将地热发电与油气生产设施结合，将地热能与风、光等可再生能源互补，并在特定条件下与海水淡化、高矿化流体综合利用等过程耦合，我国可以逐步构建一套资源利用率较高、环境风险

可控、具备工程可实施性的海洋地热综合开发体系。

(四) 经济性关键参数与实施边界

海洋地热项目的战略可操作性最终取决于资源条件、工程复杂度与市场收益之间的平衡。对现阶段而言，影响经济性的关键参数主要包括：井深与水深、储层温度与稳定流量、离岸距离、平台或井筒可改造程度、回灌条件、负荷因子、设备耐腐防垢要求以及运维窗口期。其中，钻完井与海上平台改造通常构成项目初始投资的主体，而腐蚀结垢控制、海上运维和回灌系统则显著影响全生命周期成本。

从收益结构看，海洋地热的经济性不能仅以单一发电收入衡量，而应综合评估供热 / 供冷、平台替代能源、海水淡化、副产资源回收以及减碳价值等多元收益。建议在项目决策阶段同步采用度电成

本(LCOE)、单位井产热量、静态/动态投资回收期 and 内部收益率等指标开展情景分析。总体上,近海中低温直接利用、海上油气设施改造利用和多能互补微网更接近近期可商业化的场景;而深远海高温发电、EGS及矿热联产则需在技术成熟度、环境风险和综合收益得到验证后,方可逐步推进。

五、推进海洋强国与能源强国建设的发展建议

(一) 强化顶层设计与规划引领

将海洋地热资源开发利用提升至国家战略高度,纳入“能源强国”“海洋强国”的整体战略规划中进行统筹部署。国家能源主管部门牵头制定专门的海洋地热能开发利用中长期发展规划,明确发展目标、重点任务和保障措施。在规划中,充分考虑海洋矿产与地热资源共采的发展需求,明确共采的重点区域、发展阶段和主要任务。

在海洋功能区划和海域使用管理中,统筹考虑海洋地热资源的开发需求,将海洋地热区块与油气、矿产等其他海洋资源区块进行统一规划和科学布局,避免开发活动的冲突和资源的浪费。建立海洋地热与矿产资源共采的区块划分机制,优先在资源禀赋优越、开发条件成熟的区域划定共采试验区,集中力量开展示范工程建设。

优先组织开展南海等战略海域的海洋地热资源详查与评价工作,精准摸清资源家底,为科学规划和决策提供坚实的数据支撑。同时,开展海洋矿产与地热资源共采潜力的专项评估,建立共采资源数据库和评价指标体系,为共采项目的规划布局提供科学依据。加强规划的衔接与协调,确保海洋地热发展规划与海洋经济发展规划、能源发展规划、矿产资源规划等相衔接,形成规划合力,推动海洋地热产业与海洋矿产开发产业协同发展。

(二) 加大核心技术与装备攻关力度

设立国家级的海洋地热工程技术研究中心或创新联盟,整合国内高校、科研院所、骨干企业的优势资源,构建“产学研用”深度融合的协同创新体系。重点支持海洋地热钻完井技术、热能转换技术、运维与安全防控技术等核心技术的研发,同时加大对海洋矿产与地热资源共采技术的攻关力度,

突破共采钻完井、协同提取、智能监测、生态防控等关键技术瓶颈。

实施“深海地热装备国产化专项行动”,重点支持耐高温高压钻井液、高效换热机组、海底涡轮发电机、防腐防污材料等核心装备的研发与产业化。“十四五”期间,我国在深水钻采装备国产化方面取得阶段性进展,如水下生产系统、智能钻井工具等关键设备已实现技术突破。为进一步提升自主化水平,该行动目标将延续至“十五五”时期,持续推动核心装备技术攻关与产业化应用,力争从根本上摆脱对国外技术和装备的依赖。针对海洋矿产与地热资源共采的特殊需求,研发专用的共采装备,如多功能钻井平台、协同提取设备、一体化监测系统,提高共采的效率和安全性。

加强国际科技合作与交流,积极引进吸收国外先进的海洋地热资源开发技术和经验,同时推动我国自主研发的技术和装备走向国际市场。参与全球海洋地热资源调查与技术研发合作项目,在国际舞台上争取更多的话语权和主导权。加强与“一带一路”国家的合作,共建海洋地热资源开发示范项目,推广我国的相关技术和标准,促进海洋地热产业的国际化发展。

(三) 完善政策支持与市场机制

加大财政资金的支持力度,设立海洋地热发展专项资金,对海洋地热资源调查、关键技术研发、示范工程建设等给予直接补贴或贷款贴息。对于海洋矿产与地热资源共采示范项目,给予额外的政策倾斜和资金支持,鼓励企业开展共采技术的研发与应用。落实和完善税收优惠政策,对海洋地热项目的所得税、增值税等给予减免,降低企业的研发和投资成本。

创新投融资机制,鼓励和引导社会资本通过政府和社会资本合作、绿色债券、产业投资基金等多种模式参与海洋地热项目的投资、建设和运营。建立海洋地热项目的风险分担机制,通过政府担保、保险补偿等方式,降低企业的投资风险。探索建立海洋地热发电的保障性收购制度或绿色电力证书交易制度,为海洋地热电力创造稳定的市场需求和合理的收益预期,充分调动各类市场主体的积极性。

建立海洋矿产与地热资源共采的激励机制,对

成功实现共采的项目给予补贴、税收减免等优惠政策，鼓励企业探索共采模式。完善海洋地热资源的市场化配置机制，建立健全海洋地热探矿权、采矿权的出让、转让制度，促进资源的优化配置和高效利用。

（四）加强产业协同与人才培养

着力培育和壮大海洋地热产业主体，支持有实力的能源企业和海洋工程企业通过兼并重组、战略合作等方式，向海洋地热领域延伸产业链，形成一批集“资源评价-勘探开发-装备制造-运维服务”于一体的综合性龙头企业。同时，鼓励发展一批专注于细分领域的“专精特新”中小企业，完善产业配套体系。推动海洋地热企业与海洋矿产开发企业、科研机构、高校等建立战略合作伙伴关系，形成产业协同发展的良好格局。

深化“产学研”合作，支持高校设立海洋地热相关专业方向，与企业共建实习、实训基地，培养一批既懂地质、海洋，又懂能源工程和经济管理的复合型、创新型人才，为产业发展提供坚实的人才保障。加强对现有从业人员的培训，提高其专业技能和综合素质，适应海洋地热产业发展的需求。

加强国际合作与交流，积极参与全球海洋地热资源的调查与研究，引进吸收国际先进技术和管理经验。同时，推动我国成熟技术和标准的国际化输出，提升我国在全球海洋地热领域的话语权和影响力。举办国际海洋地热产业论坛、技术研讨会等活动，搭建交流合作平台，促进国内外企业、科研机构之间的技术交流与合作。

（五）健全生态安全与风险防控体系

坚持绿色开发理念，建立健全海洋地热资源开发的环境影响评价和环境风险评估制度，对项目的规划、建设、运营全生命周期进行严格的生态环境监管。制定海洋地热资源开发的环境保护技术规范 and 标准，强制要求采用尾水回灌、绿色防腐防污等环保技术，最大限度地降低开发活动对海洋生态环境的影响。

针对海洋矿产与地热资源共采项目的特殊性，制定专门的生态环境评价标准和风险防控规范，加强对共采项目的生态环境监管。建立共采项目的生态环境监测网络，实时监测项目对海洋生态环境的

影响，及时发现和处理生态环境问题。

建立海洋地热资源开发的环境风险预警与应急响应体系，加强对海洋生态环境的长期监测与评估，一旦发生生态环境问题，能够迅速启动应急预案，采取有效的防控和修复措施。加强生态修复技术的研发与应用，对受损的海洋生态环境进行及时修复，保障海洋生态系统的健康稳定。

加强科普宣传和公众沟通，提高社会各界对海洋地热作为清洁可再生能源的认知度和接受度，营造有利于海洋地热产业健康发展的良好社会氛围。向公众宣传海洋矿产与地热资源共采的优势和意义，提高公众对共采项目的接受度和支持度。

六、结论与展望

（一）结论

我国海洋地热资源禀赋优异，分布广泛，特别是南海等区域的高温热液型资源具有重要开发潜力，分区域、分阶段推进具备战略价值。海洋地热与海上油气设施协同利用、与海水淡化和多能互补系统耦合，已展现出较明确的现实意义；而海洋矿产与地热资源协同开发虽然具有研究价值，但总体仍处于前瞻论证和示范探索阶段。

当前，我国在海洋地热资源勘探、钻完井、热能转换等关键技术方面已取得阶段性进展，并在海上平台能源利用等相关领域积累了一定的实践经验。但整体产业仍处于发展初期，面临资源勘探精度不足、深层资源家底不清、关键技术与装备能力不足、经济性边界尚不清晰、生态风险防控体系有待完善等问题。特别是矿热协同开发尚缺乏成熟案例和标准体系，需要在技术、经济和环境多维度进行持续验证。

针对以上挑战，本文提出的因地制宜的发展路径和全方位的战略保障体系，为破解这些难题提供了系统性的解决方案。通过强化顶层设计、加大技术攻关、完善政策支持、推动产业协同和健全生态安全防控，可以有效推动我国海洋地热产业实现从示范验证到商业化推广，再到规模化发展的跨越式发展，同时逐步实现海洋矿产与地热资源共采模式的成熟与广泛应用，为我国经济社会的可持续发展注入新的动力。

(二) 展望

展望未来,随着科技进步和创新驱动战略的深入实施,海洋地热资源开发利用将迎来新的发展机遇。在技术层面,未来5~10年,我国有望在EGS深层储层改造、耐高温高压材料、深远海智能运维等领域取得重要进展,推动海洋地热资源开发全链条技术持续提升。同时,海洋矿产与地热资源协同利用技术也有望逐步完善,但其推广仍将取决于资源品位、工程成熟度和环境约束条件。

在产业层面,预计2035年,若示范工程持续推进并形成稳定的商业模式,我国海洋地热有望在南海岛礁能源保障、东部沿海清洁供暖、海水淡化、海上平台供能等领域得到更广泛应用,逐步成长为海洋新能源体系中的重要组成部分。对于海洋矿产与地热资源协同利用,则更可能首先在高矿化流体综合利用、平台能源替代等细分场景实现突破。

在战略层面,海洋地热的规模化开发利用将提升我国在全球海洋能源领域的话语权和竞争力,推动我国从海洋能源技术的“跟跑”者逐步向“并跑”者迈进。随着海洋地热与油气、海水淡化、“风光储”等系统的深度耦合,其在保障能源安全、推动绿色低碳转型和服务海洋强国建设中的作用将更加突出。

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 10, 2026; **Revised date:** April 22, 2026

Corresponding author: Duo Ji is a professor from State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is geothermal exploration. E-mail: bmwb@vip.163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Integrated and Coordinated Development of Offshore Energy” (2025-HZ-30)

参考文献

- [1] Pollack H N, Hurter S J, Johnson J R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set [J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(3): 267–280.
- [2] 付强,程兵,吴英,等.我国海洋地热能开发利用研究[J].*中国工程科学*, 2024, 26(4): 222–233.
Fu Q, Cheng B, Wu Y, et al. Development and utilization of marine geothermal energy in China [J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2024, 26(4): 222–233.
- [3] 2021年度中国地质调查局中国地质科学院地质调查十大进展地质科技十大进展[J].*中国地质*, 2022, 49(1): 350–354.
- [4] 蔡美峰,马明辉,潘继良,等.矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J].*工程科学学报*, 2022, 44(10): 1669–1681.
Cai M F, Ma M H, Pan J L, et al. Co-mining of mineral and geothermal resources: A state-of-the-art review and future perspectives [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1669–1681.
- [5] 万志军,毕世科,张源,等.煤-热共采的理论与技术框架[J].*煤炭学报*, 2018, 43(8): 2099–2106.
Wan Z J, Bi S K, Zhang Y, et al. Framework of the theory and technology for simultaneous extraction of coal and geothermal resources [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2099–2106.
- [6] Liu J, Martin P F, McGrail B P. Rare-earth element extraction from geothermal brine using magnetic core-shell nanoparticles-techno-economic analysis [J]. *Geothermics*, 2021, 89: 101938.
- [7] 多吉,周守为,刘清友,等.中国海洋地热资源潜力和开发利用战略研究[R].北京:中国海洋资源发展战略研究中心,2023.
Duo J, Zhou S W, Liu Q Y, et al. Study on the potential and exploitation strategy of marine geothermal resources in China [R]. Beijing: China Offshore Resources Development Strategy Research Center, 2023.
- [8] 马冰,贾凌霄,于洋,等.世界地热能开发利用现状与展望[J].*中国地质*, 2021, 48(6): 1734–1747.
Ma B, Jia L X, Yu Y, et al. The development and utilization of geothermal energy in the world [J]. *Geology in China*, 2021, 48(6): 1734–1747.
- [9] Toth A N. Geothermal utilization statistics 2019 [M]. Amsterdam: Elsevier, 2022: 220–234.
- [10] Ma D, Gao X F, Zhang J X. Co-exploitation of mine-derived geothermal energy: Recent advances and emerging perspectives [J]. *GeoEnergy Communications*, 2025, 1(1): 12.
- [11] 吴必豪,张光学,祝有海,等.中国近海天然气水合物的研究进展[J].*地质前缘*, 2003, 10(1): 177–189.
Wu B H, Zhang G X, Zhu Y H, et al. Progress of gas hydrate investigation in China offshore [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 177–189.
- [12] 田丽艳,刘红玲,吴涛,等.IODP U1502B 钻孔高温蚀变玄武岩的锂同位素特征及对南海初始扩张期热液流体循环的指示[J].*矿物岩石地球化学通报*, 2023, 42(4): 685–701, 682.
Tian L Y, Liu H L, Wu T, et al. Li isotope characteristics of high-temperature altered basalts from IODP Hole U1502B and its implication for seafloor hydrothermal circulation at the early spreading stage in South China Sea [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2023, 42(4): 685–701, 682.
- [13] 黄磊,陈泓君,高红芳,等.南海中央海盆热流特征及成因[J].*海洋地质前沿*, 2013, 29(11): 39–43.
Huang L, Chen H J, Gao H F, et al. Characteristics and genesis of geotherm in the central basin of South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(11): 39–43.
- [14] 徐行,姚永坚,彭登,等.南海西南次海盆的地热流特征与分析[J].*地球物理学报*, 2018, 61(7): 2915–2925.

- Xu X, Yao Y J, Peng D, et al. The characteristics and analysis of heat flow in the Southwest sub-basin of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(7): 2915–2925.
- [15] SINTEF. Artificial geysers can compensate for our mineral shortages [EB/OL]. (2024-05-22)[2026-02-28]. <https://www.lifetechnology.com/blogs/life-technology-science-news/artificial-geysers-can-compensate-for-our-mineral-shortages>.
- [16] Wang R Z, Wang J K, Li H D, et al. A study on the acquisition technology for weak seismic signals from deep geothermal reservoirs [J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2751.
- [17] 吴德城, 侯方辉, 祁江豪, 等. 中国近海新构造活动断裂调查与地震勘探方法 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 121–132.
Wu D C, Hou F H, Qi J H, et al. Seismic survey and exploration methods for Neotectonic active faults in the area off China continent [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 121–132.
- [18] 王春娟, 辛庞晨雨, 刘大海. 中国海洋工程装备国产化进程及其高质量发展趋势 [J]. *中国软科学*, 2023 (S1): 379–387, 413.
Wang C J, Xin P C Y, Liu D H. Localization process of China's marine engineering equipment and its high-quality development trend [J]. *China Soft Science*, 2023 (S1): 379–387, 413.
- [19] 邱楠生, 朱传庆, 宋佳霖, 等. 中国地热资源分布及开发利用 [J]. *石油学报*, 2026, 47(1): 294–310.
Qiu N S, Zhu C Q, Song J L, et al. Distribution, development and utilization of geothermal resources in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2026, 47(1): 294–310.
- [20] 吴微, 赵荣钦, 刘文锴, 等. “双碳”目标下城市地热能开发利用研究现状与展望 [J/OL]. *水利水电技术(中英文)*, 1–15[2026-02-28]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250711.1152.002>.
Wu W, Zhao R Q, Liu W K, et al. Research status and prospect of urban geothermal energy development and utilization under the “dual carbon” goal [J/OL]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1–15[2026-02-28]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250711.1152.002>.
- [21] Cammarata G, Cammarata L, Petrone G. Thermodynamic analysis of ORC for energy production from geothermal resources [J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 1337–1343.
- [22] Eyerer S, Dawo F, Wieland C, et al. Advanced ORC architecture for geothermal combined heat and power generation [J]. *Energy*, 2020, 205: 117967.
- [23] Hiriart G, Prol-Ledesma R M, Alcocer S M, et al. Submarine geothermics; hydrothermal vents and electricity generation [R]. Bali: World Geothermal Congress 2010, 2010.
- [24] Karason B, Gudjonsdottir M S, Valdimarsson P, et al. Utilization of offshore geothermal resources for power production [R]. California: Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2013.
- [25] Goosen M, Mahmoudi H, Ghaffour N. Water desalination using geothermal energy [J]. *Energies*, 2010, 3(8): 1423–1442.
- [26] Alcocer S M, Hiriart G. An applied research program on water desalination with renewable energies [J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2008, 4(3): 204–211.
- [27] Sircar A, Bist N, Yadav K. A comprehensive review on exploration and exploitation of offshore geothermal energy [J]. *Marine Systems & Ocean Technology*, 2023, 17(3): 135–146.
- [28] Arvanitis A. Exploitation of low enthalpy geothermal resources in Greece [R]. Mati: CRES Geothermal workshop, development of bilateral relations in the geothermal energy field-workshop, 2017.
- [29] 唐晓音, 钟畅, 杨树春, 等. 中国海及邻区盆地现今地温场特征及其影响因素 [J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 911–921.
Tang X Y, Zhong C, Yang S C, et al. Characteristics and influence factors of the present geothermal field for basins in China's offshore and adjacent areas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 911–921.
- [30] 李文, 孔祥军, 袁利娟, 等. 中国地热资源概况及开发利用建议 [J]. *中国矿业*, 2020, 29(S1): 22–26.
Li W, Kong X J, Yuan L J, et al. General situation and suggestions of development and utilization of geothermal resources in China [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(S1): 22–26.
- [31] 郑华安, 宋荣彩, 宋吉锋, 等. 基于多源地质和地球物理参数融合的莺歌海盆地大地热流预测 [J]. *天然气工业*, 2025, 45(8): 170–180.
Zheng H A, Song R C, Song J F, et al. Prediction of geothermal heat flow in the Yinggehai Basin based on integrated multi-source geological and geophysical parameters [J]. *Natural Gas Industry*, 2025, 45(8): 170–180.
- [32] 韩冬, 王若璇. 渤海海域地热资源特征及储量评价 [J]. *能源与节能*, 2023 (10): 67–70.
Han D, Wang R X. Characteristics and reserves evaluation of geothermal resources in Bohai Sea area [J]. *Energy and Conservation*, 2023 (10): 67–70.
- [33] 张佳豪, 宋荣彩, 郑峰, 等. 基于自然伽马测井的莺歌海盆地中央凹陷地层生热率及岩石圈热结构研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(11): 108–117.
Zhang J H, Song R C, Zheng F, et al. Natural gamma-ray log-derived heat production rates of strata and lithospheric thermal structure in the central depression, Yinggehai Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(11): 108–117.
- [34] Zhang J H, Song R C, Zheng F, et al. Study on stratigraphic heat generation rate and lithospheric thermal structure of the central depression in the Yinggehai Basin based on natural gamma-ray logging [J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2024, 52(11): 108–117.
- [35] Tu S Q, Zuo Y H, Yang M H, et al. Evaluation of cenozoic geothermal resources of the Dongpu depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Journal of GeoEnergy*, 2024, 2024(1): 7685931.
- [36] 田振环, 王厚杰, 王威, 等. 海上地热能开发现状及其对中国的启示 [J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(6): 1–12.
Tian Z H, Wang H J, Wang W, et al. Status quo of offshore geothermal energy development and its enlightenment to China [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(6): 1–12.
- [37] Tian Z H, Wang H J, Wang W, et al. Current status of offshore geothermal energy development and its implications for China [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(6): 1–12.
- [38] Cammarata G, Cammarata L, Petrone G. Thermodynamic analysis of ORC for energy production from geothermal resources [J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 1337–1343.
- [39] Eyerer S, Dawo F, Wieland C, et al. Advanced ORC architecture for geothermal combined heat and power generation [J]. *Energy*,

- 2020, 205: 117967.
- [40] 李锋, 邹信波, 王中华, 等. 海上稠油地热水驱提高采收率矿场实践——以珠江口盆地EP油田HJ油藏为例 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 104–112.
- Li F, Zou X B, Wang Z H, et al. Field practice of offshore heavy oil geothermal water flooding for EOR: Taking HJ reservoir in EP oilfield in Pearl River Mouth basin as an example [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(1): 104–112.
- [41] Li F, Zou X B, Wang Z H, et al. Enhanced recovery practice of thermal water flooding in offshore heavy oil fields: A case study of the HJ reservoir in EP oilfield, Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(1): 104–112.
- [42] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势 [J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1–9.
- Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1–9.
- [43] Wang G L. Current status and development trends of China's geothermal resources [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 27(1): 1–9.
- [44] 亢方超, 唐春安, 李迎春, 等. 增强地热系统研究现状: 挑战与机遇 [J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1767–1777.
- Kang F C, Tang C A, Li Y C, et al. Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1767–1777.
- [45] Kang F C, Tang C A, Li Y C, et al. Research status of enhanced geothermal systems: Challenges and opportunities [J]. *Journal of Engineering Sciences*, 2022, 44(10): 1767–1777.
- [46] 王佳贤, 刘昌岭, 宁伏龙, 等. CO₂-CH₄置换水合物开采方法及其强化技术研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 190–204.
- Wang J X, Liu C L, Ning F L, et al. Technological research progress on CO₂-CH₄ replacement for hydrate exploitation and enhancement [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(1): 190–204.
- [47] Wang J X, Liu C L, Ning F L, et al. Research progress on CO₂-CH₄ displacement hydrate extraction methods and enhanced technologies [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2023, 43(1): 190–204.