

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 Zhenhuan, WANG Houjie, WANG Wei, et al. Status quo of offshore geothermal energy development and its enlightenment to China[J].

Marine Geology Frontiers, 2024, 40(6): 1-12.

# 海上地热能开发现状及其对中国的启示

田振环<sup>1,2,3</sup>, 王厚杰<sup>1</sup>, 王威<sup>2,3</sup>, 史经昊<sup>1</sup>

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 山东省第一地质矿产勘查院, 济南 250100;

3 山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 济南 250100)

**摘要:** 在世界能源短缺以及实现碳减排目标的背景下, 随着海洋和地热能开发技术的进步, 海上地热能的潜力越来越受到人们的关注。本文分析了目前全球海上地热资源开发热点区域分布, 以及海上地热资源利用的优势和劣势, 梳理了国内外海洋地热资源利用现状和关键开发技术, 包括海上地热利用方式、地热勘查技术、地热资源评价技术、地热利用技术和地热能开发影响评价技术等, 指出了当前中国海上地热能发展利用过程中面临着基础资料薄弱、关键技术创新力不足、核心装备自主性差、激励政策不够完善等诸多挑战, 并给出了相应的发展建议。

**关键词:** 海上地热能; 海洋地热发电技术; 海洋地热能提取; 废弃油气井改造; 环境影响评价

中图分类号: P738.6; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.172

## 0 引言

全球气候变化问题目前已经成为人类发展面临的巨大挑战之一。随着 2050 年实现全球净零排放目标达成国际共识, 寻找非常规能源或新能源替代化石能源已成为当前各国能源研究的重点。作为潜在的优质零碳、可再生清洁能源, 地热能因其储量大、参数稳定、利用率高、安全可靠、可综合利用等优势成为替代能源的选择之一<sup>[1]</sup>。其实人类早在数千年前就开始利用陆地地热能, 不过仅限于温泉洗浴、医疗保健等方面。直到百年前的 20 世纪初, 随着采暖技术和地热能发电的成熟, 才开启了陆地地热能的广泛应用。虽然陆地地热能开发利用已经取得了较显著的成效<sup>[2]</sup>, 但对于海洋底部蕴藏的丰富地热资源, 长期以来并未引起人们的兴趣。随着常规能源价格的持续上涨、对地热资源开发知识的理解加深, 海洋地热能也逐渐进入人们的视野。

收稿日期: 2023-07-06

资助项目: 山东省第一地质矿产勘查院院管科创项目“黄河三角洲海域废弃钻井平台综合利用研究”(鲁地一勘发[2021]23号-KC202104)

第一作者: 田振环(1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质等方面的研究工作。E-mail: tt266003@163.com

近几十年来, 尤其是 21 世纪以来, 开发和利用海上地热能的研究和尝试越来越频繁。海上地热资源的利用对于解决能源、环境等问题, 促进可持续发展具有重要意义。本文通过对海上地热的利用现状和关键开发技术进行综述, 以期为中国深入挖掘海上地热资源的潜力提供建议和对策。

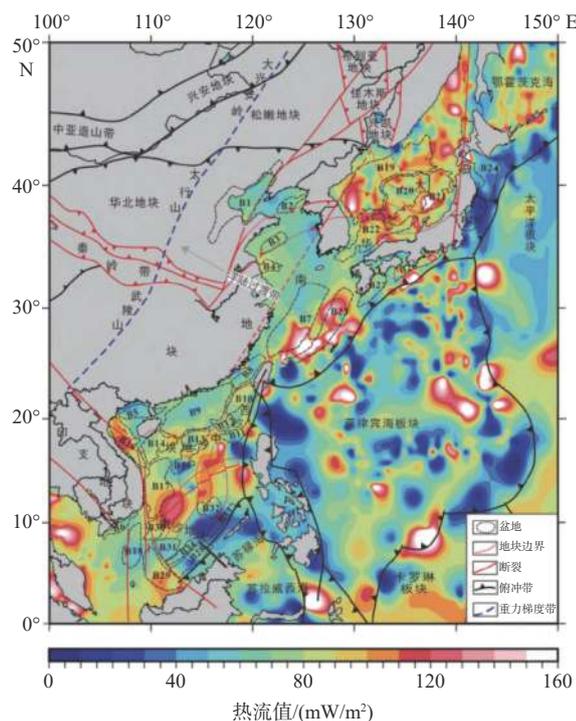
## 1 海洋地热资源简况

### 1.1 全球和中国海上地热资源的分布

海上地热能是指位于海洋底部、源自地球内部的天然热能资源。全球大洋的平均热流(100 mW/m<sup>2</sup>)明显高于陆地平均热流(65 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[3]</sup>, 海洋地热资源的分布规律与板块构造运动密切相关<sup>[4]</sup>, 优质高温地热资源一般分布在板块边缘带(碰撞带、俯冲带和洋中脊)和大洋板块内部热点或地幔柱所在区域。在离散型板块边界, 由于浅层岩浆的存在, 高热流和地热梯度通常出现在大洋中脊和热液喷口, 喷口处温度可超过 370 °C, 代表性区域如冰岛周边海域; 在汇聚型板块边界, 俯冲的大洋板块发生熔融, 出现火山、裂隙和热液喷口, 例如日本、中国台湾、印度尼西亚和新西兰等国家和地区的附近海域;

在大洋板块热点和地幔柱区域,岩浆从地幔深处上升至岩石圈底部,形成海山,如太平洋的夏威夷群岛。此外,在某些边缘海盆地也存在具有开发潜力的中高地热资源,包括地中海、黑海、里海和中国边缘海等。例如,位于北海盆地维京地堑北部的海洋石油生产平台所产生的地热水可以满足每个油田约60%的电力需求<sup>[5-6]</sup>。在爱尔兰海岸以北Dunquin,通过大口径水平井开采海底地热,地热水温度可达100℃,产量为 $1.59 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,达到了发电的要求<sup>[2]</sup>。

中国近海受控于太平洋板块俯冲引起的东部区域拉张和印度板块与欧亚板块碰撞造成的局部挤压的构造格局,地热资源储量大、分布广。如图1所示,海域热流值整体呈现出“北低南高、西高东低”的态势,平均值为 $75.5 \text{ mW/m}^2$ <sup>[7]</sup>,以中低温地热资源为主。高温地热资源主要分布在以下区域:弧后活动盆地成因的冲绳海槽盆地及周边海域(图1中



盆地代号: B1-渤海湾盆地; B2-北黄海盆地; B3-南黄海南部盆地; B4-南黄海南部盆地; B5-北部湾盆地; B6-湄公河盆地; B7-东海陆架盆地; B8-台西盆地; B9-珠江口盆地; B10-台西南盆地; B11-笔架南盆地; B12-尖峰盆地; B13-双峰盆地; B14-琼东南盆地; B15-中沙海槽盆地; B16-莺歌海盆地; B17-中建南盆地; B18-万安盆地; B19-日本海盆地; B20-大和盆地; B21-新泻盆地; B22-庆尚盆地; B23-冲绳海槽盆地; B24-北上盆地; B25-关东盆地; B26-吐岐-托萨盆地; B27-宫崎盆地; B28-文莱沙巴盆地; B29-曾母盆地; B30-南薇西盆地; B31-北康盆地; B32-礼乐盆地; B33-巴拉望盆地; B34-南沙海槽盆地

图1 中国近海及周边海域盆地的热流值分布<sup>[6]</sup>

Fig.1 Distribution of heat flow values within the basins in offshore China<sup>[6]</sup>

的B23,下同),平均热流值为 $196 \text{ mW/m}^2$ <sup>[8]</sup>;受晚中新世特别是上新世以来的岩浆活动影响,琼东南盆地(B14)深水区具有较高的热流值;局部区域可能受控盆断裂的扭张作用和泥底辟影响,莺歌海盆地(B16)也显示出较大的热流值;南海中央海盆为弧前和弧后盆地,也具有显著高热流值特征,为 $90 \sim 120 \text{ mW/m}^2$ 。此外,受相邻陆地构造的影响,渤海湾盆地(B1)、南黄海盆地(B3和B4)和东南沿海盆地(B7、B8和B9)也具备形成中高温地热资源的条件。同时,这些区域基本都蕴含丰富的油气资源,存在并开发有大型油气田,通常伴生大量且温度很高的水或气体。比如,位于莺歌海盆地的已开发的东方13-2高温高压气田,开发深度3000m左右地层温度可达150℃以上,海域地热梯度是地壳平均地热梯度的2倍,压力系数超过1.8<sup>[9]</sup>,深部地层中的水体温度高、压力足、流量大,达到了地热能发电的条件。胜利油田渤海湾盆地海域内的油井伴生流体温度可达135℃,也具有利用潜力。

尽管海底地热资源十分丰富且有多种来源,但优质高温地热资源相对较少,受地理位置、开发成本和技术的限制,从热流值高、热流梯度大、易开发性和成本低等多个条件考虑,已开发的海上油气田<sup>[10-11]</sup>、热液喷口<sup>[12-15]</sup>和海山<sup>[16-17]</sup>成为开发海洋地热的首选区域,相关地热能高效利用技术成为近年来研究的热点。

## 1.2 海洋地热资源的特点

与陆地地热资源相比,除了可再生、绿色低碳环保、能量稳定、持续性强、安全可靠和多功能性(采暖、水产养殖、发电和辅助矿产开发)等地热能共有的特点<sup>[1]</sup>,海洋地热能有其独有的特性<sup>[18-19]</sup>,其优势和劣势总结详见表1。海洋地热能的这些特性为其开发工作提供了巨大潜力和便利,但同时也带来了许多困难,如何实现海底地热资源的高效、规模化利用,必须扬长避短,针对其形成机理、海上开发方式和关键技术进行更深入的研究。

## 2 海上地热利用方式及现状

### 2.1 传统直接利用

利用海洋地热资源的传统方式主要包括在滨海地区开采地下热水用于供暖、水产养殖,以及使用油气生产的伴生水热量为海上油气平台供暖、供

表 1 海洋地热能的特性

Table 1 Characteristics of offshore geothermal energy

参数	具体特性
热源	以深部地幔的热量为主
储量和质量	海洋地热能储量大、优质高温地热资源多
最大开采深度	与海洋钻采设备的发展有关, 目前 5 000~6 000 m
采热方式	以注入海水或 CO <sub>2</sub> 等介质循环热交换为主
海域使用	除了争议海区, 权属明确, 开发纠纷少
潜在最优开发区域	针对性强, 包括已开发的海上油气田、热液喷口和海山
开发难度	难度较大, 基础资料少、海洋深度大、环境恶劣、地理位置偏远以及海洋技术发展限制等
开发成本	前期勘查、设备制造安装、后期维护成本都很高
技术成熟度	起步晚, 成熟度很低, 从原理分类到开采利用皆需参照陆上地热能开发技术
海洋环境影响	影响大且未知, 尤其是深海和地下深部独特脆弱的生态系统

热水等。

早在 20 世纪 70 年代, 胜利油田就在邻近黄河入海口的孤岛地区打出第 1 口温泉井, 目前东营市共勘探发现地热井 50 余口, 主要用于供暖<sup>[20]</sup>。位于天津滨海新区海河入海口的渤海石油基地应用地热直供结合热泵供暖的技术, 实现清洁高效供暖<sup>[21]</sup>。大连四季运营的海洋主题温泉也是典型的滨海地热利用案例<sup>[22]</sup>。

近年来地热能也被广泛应用于海洋水产的养殖, 可有效降低养殖能耗。东营地区曾用地热水进行罗非鱼越冬保种。王峰等<sup>[23]</sup>论证了暖温性近海大型底层鱼类半滑舌鳎在工厂化循环水养殖利用地热资源的效率和可持续性。张效新等<sup>[24]</sup>利用属于渤海退潮之地的滨州地下卤水与海水成分接近的特点, 把位于地下深度 1 600 m、出水口温度达 69 °C 的地热水与黄河水配兑, 开展全年凡纳滨对虾工厂化循环养殖试验并获得成功。闫欣等<sup>[25]</sup>探索利用地下海水的热量进行金乌贼亲体越冬养殖, 取得了一定的成效。

## 2.2 发电

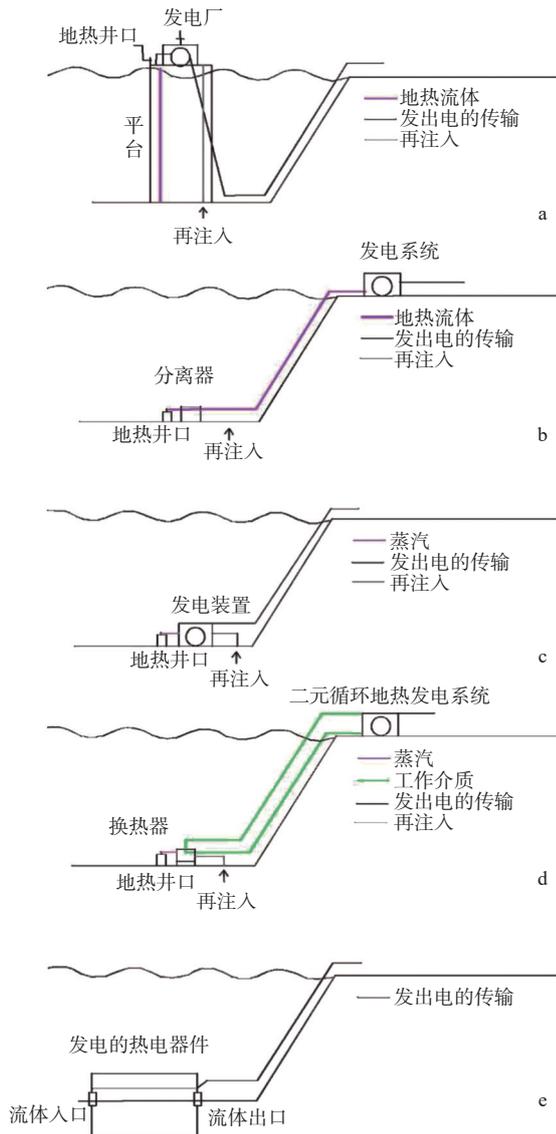
从仅有的几篇公开报道来看, 目前利用海上地热发电项目基本处于论证和设计阶段, 真正投入开发的项目极少。首次尝试利用海洋地热发电的项目来自意大利, Marsili 是意大利南部海洋中的一座水下火山, 从该火山中提取蒸汽来发电的项目目前正在推进, 基本方案为地热从海底井口通过适当的热力学循环连接到蒸汽轮机, 蒸汽轮机与冷凝器系统、发电机和变压器等设备一起安置在海洋平台上。其主要目标是建成 10 年后发电量达到 600 MW, 15 年后约 1 200 MW<sup>[16-17]</sup>。此外, AULD 等<sup>[26]</sup>论证了北海北部(布伦特产区)一系列海上油田伴生热

卤水的发电潜力, 6 个油田具有通过以热卤水为能量来源的有机朗肯循环(ORC)产生超过 10 MW 的发电能力, 其中 Ninian 油田最高预测为 31 MW。在不考虑温室气体排放税的情况下, 预计 10 MW 发电规模的 ORC 系统的投资回收期为 3.09~4.53 a。北海油田生产的地下盐卤水平均温度为 108±26 °C, 若使用 ORC, 按每天生产 5 万桶水, 储层温度 100 °C, 冷凝温度 5 °C, 可产生理论电力约 250 MW<sup>[5]</sup>。KARASON 等<sup>[13]</sup>从技术可行性、估计功率输出和经济成本等多角度, 对利用海洋地热能发电的多个方案进行了分析和比较(图 2)。并针对冰岛雷克雅内斯海脊的热液喷口(深度约 400 m)的地热发电, 提出了一个可行的备选方案: 在陆地上建设一个与海床井口相连的单闪蒸汽系统地热发电厂。HIRI-ART 等<sup>[12]</sup>提出在加利福尼亚湾的热液喷口, 建设水下二元循环地热发电系统。ARYADI 等<sup>[14]</sup>提出了一种利用 ORC 法的热液喷口开采技术模型, 利用水深 2 000 m 处的中等直径热液喷口, 至少可以得到 15 MW 的发电量。XIE 等<sup>[15]</sup>研发了一种热电转换器, 该转换器能通过热管从海底热液喷口的高温热液流体中收集热能, 并通过热电发电机将热量转换为电能。还有学者提出了利用印度尼西亚海洋火山地热发电的想法<sup>[17]</sup>。BANERJEE 等<sup>[27]</sup>评估了利用海上风力涡轮机单桩结构从洋壳中提取地热能的可能性, 利用基于塞贝克效应的温差发电装置, 从流体管道组成的主动式换热系统中提取的最大功率为 242 kW。

## 2.3 辅助海洋油气开发

### 2.3.1 稠油开采

海上稠油储量十分丰富<sup>[28]</sup>, 热采技术是其开采的主要方式, 通过向储层里注入热流体降低原



(a) 单闪蒸汽发电系统布放在海洋平台上; (b) 在海床上带有分离器的陆基发电厂; (c) 发电装置放置于海底; (d) 二元循环地热发电系统位于陆地上, 在海床上设有换热器; (e) 利用海洋与地热流体的温差发电的热电器件

图2 海洋地热发电方案概图<sup>[13]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of offshore geothermal power generation scheme<sup>[13]</sup>

油黏度、改善水油流度比, 进而提高驱油效率<sup>[29]</sup>。受限于作业空间和开采成本, 目前海上开发稠油主要采用蒸汽吞吐或蒸汽驱等热采方式<sup>[30]</sup>, 但存在能源损失大、作业频繁且危险等不足。海上稠油油藏埋深相对较深, 层系间的温差可提供丰富的地热资源<sup>[31]</sup>。近年来, 不少学者提出利用深部地热能辅助开采稠油的设想, 目前利用地热能辅助海上稠油开采的相关研究仍处于起步阶段。针对渤海某海上油田和南海某海上油田的浅层稠油开采<sup>[32-33]</sup>, 提出了利用深部地热能辅助开采浅层稠

油的方法, 进行了可行性分析, 并通过物理模型和数值模拟研究了注水温度、注水速度和水平井段长度对开采效果的影响。

地热能辅助开采浅层稠油方法如图3所示, 整个系统主要包括生产平台以及注水井和生产井, 注水井由稠油储层注入水平井段和地热储层换热水平井段组成, 利用海水或者采出水作为换热介质, 将注入水从注水井的油管注入, 依次经过海水层、稠油储层到达深部地热储层, 注入水进入注水井的换热水平井段环空内, 与地热储层进行热交换, 并从环空内上返至稠油储层内的水平井段进行加热, 油管使用隔热材料减少热交换, 保证上返的注入水到达稠油储层时维持较高的温度。海上现场实践证明, 地热驱油可以降低原油黏度、提升驱油效率, 提高油井产能和油田采收率<sup>[33]</sup>。

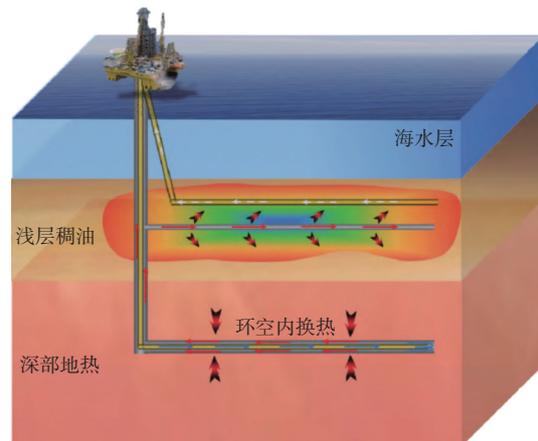


图3 海上地热能辅助开采浅层稠油方法示意图<sup>[32]</sup>

Fig.3 Offshore geothermal energy assisted recovery for shallow heavy oil reservoir<sup>[32]</sup>

### 2.3.2 天然气水合物开采

被誉为“未来的能源”的可燃冰在储层中呈现为固态, 如何将其低成本、高效、稳定地离解为可流动的流体是实现商业化开采的关键, 但受目前技术条件的限制, 迄今尚未取得突破性进展<sup>[34-35]</sup>。据相关试验研究<sup>[36-37]</sup>, 对水合物沉积物进行注热和降压可有效加速其离解过程。据此, 近年来诸多学者都提出了利用深层地热开采可燃冰的设想<sup>[38-40]</sup>, 基本思想是把低温传热介质(海水、CO<sub>2</sub>等)泵注入海底高温岩层后抽取热量, 升温后的介质经套管返至天然气水合物储层, 加速其离解。在目前已成熟的注热法和降压法的基础上<sup>[41]</sup>, 有学者设计了一套通过将天然海水注入深海地热储层中, 海水抽取深层地热后循环至浅层可燃冰储层中, 联合注热法和降压

法促使可燃冰离解的耦合开采方法<sup>[42]</sup>。此联合循环工艺系统如图 4 所示, 天然海水由换热井垂直段注入深层地热岩层, 进入换热井水平段中, 在地热储层中被加热, 由采出井垂直段将高温海水抽取并运送至天然气水合物储层内的采出井水平段。采出井垂直段的油管采用隔热材料, 以降低海水上返阶段的热损耗。此新型联合开采工艺, 将换热、抽热及注热法开采可燃冰技术相结合, 不仅解决了注热法能源消耗严重的问题, 同时规避了降压法由于温降造成二次结冰的现象, 实现了深海天然气水合物和地热能的高效综合利用。有研究进一步提出, 可利用现有油气井的地热, 基于新型多分支井系统, 把降压与热驱相结合进行开发海上天然气水合物, 从而降低开发成本, 提高开采效率<sup>[43]</sup>。目前国内外可燃冰的开采仍处于试采阶段, 相关技术和方案尚未应用到实际生产中。

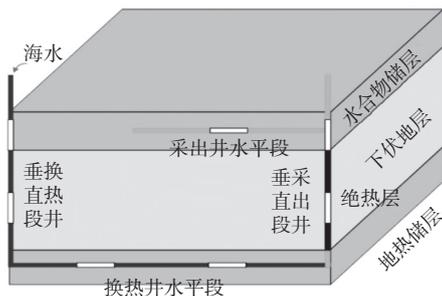


图 4 联合深海地热开采可燃冰系统示意图<sup>[42]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of a system for natural gas hydrates mining jointed by deep-sea thermal extraction<sup>[42]</sup>

## 2.4 综合利用

单一的海洋地热能利用方式效率较低, 为了提高转化效率, 减少能量损耗, 多名学者探索海洋地热能综合利用方式, 提供了多种方案和设想。其中一类方式是考虑把海洋地热能发电后的余热用于取暖、水产养殖等, 通过对地热水温度从高到低逐级提取热量, 实现地热能综合梯级利用。另一类方式是海洋地热能与其他可再生能源(风能、温差能、太阳能等)结合利用。例如, 海洋地热能 and 地热能联合发电, 温海水穿过海洋温差发电系统后与地热发电系统的回灌井相连通, 其中海洋温差发电系统依靠海水压差作用和高效冷凝管等技术实现全流程无泵运行, 而地热发电系统采用冷海水作为冷却水源以维持更低的冷凝温度, 提高了 2 种能量的发电效率和能量利用率<sup>[44]</sup>。

## 3 海上地热开发关键技术

### 3.1 海上地热资源勘探技术

海上地热开发首先需要查明海区内的地热资源, 主要通过海上地热资源勘查工作, 包括地质、地球物理、地球化学综合调查以及钻探与试验、取样测试、动态监测等, 综合分析地下、钻井和海上信息, 确定勘查海区地层结构、热储物性及岩性特征、富集区分布, 圈定地热异常范围、热储空间分布特征等。根据勘查工作程度, 可分为资料搜集分析调查、预可行性勘查、可行性勘查和开采等阶段。目前, 常用的海洋地热资源调查技术主要包括地球物理勘探、地球化学勘探、岩芯分析、海洋水文调查等。地球物理勘探技术包括地震法、电磁法、磁法、重力探测法、测井等。地球化学勘探技术包括水文、岩石、气体等地球化学勘察。岩芯分析和水文调查主要是通过对海底岩芯、海洋水体和地下水进行化学、物理分析, 获得生、储、盖、控热构造等信息。实际工作中基本采用多方法组合勘探来提高调查的准确性。地温测量是地热资源调查中最直接、最有效的勘探技术, 通过直接的钻井或探针测温获得的地下和地表的热参数最为可靠。近年来, 海底热流原位、长期观测技术以及海洋钻井技术不断进步, 有效提高了海上地热资源的勘查能力。

#### 3.1.1 海底热流原位、长期观测技术

目前海底热流原位测量技术主要包括海底热流探针测量技术、热毯式热流测量技术和钻孔热流测量技术<sup>[45]</sup>。其中, 钻孔式热流测量技术可以测量海底以下乃至上千米深度的热流值, 受海底浅层影响小、测量精度高, 但测量费用高、效率低<sup>[46]</sup>。热毯式热流测量是种新型海底热流原位测量技术, 适用于无法插入式测量的无或少沉积物的海床<sup>[47]</sup>。海底热流探针是较成熟、应用最广泛的技术, 适用于海底以下数十米的沉积物热流测量。基于此, 近年来多国学者研发了多种海底热流长期观测系统, 目前主要有日本发展了基于水下机器人(ROV)作业的 LTMS 和 SAHF 系统及自浮式海底热流长期观测系统。其中, LTMS 和 SAHF 系统可靠性和成功率都很高, 但依赖 ROV 作业平台, 成本高、局限性大。而自浮式系统独立性强, 但风险高, 且需要抛弃温度探针, 整体重复使用性差。中国学者基于自主研发的自容式微型测温技术, 提出了系缆式海

底热流长期观测系统<sup>[48]</sup>。海底钻孔热流探测进一步发展 CORK(Circulation Obviation Retrofit Kit)技术,可进行钻孔热流的长期监测。

### 3.1.2 海上地热钻井技术

海洋地热井钻探是勘探和获取海底地热资源的主要途径。海上地热井的井身设计类似于常规海洋油气井,只是套管的直径有所不同<sup>[13]</sup>,可以借鉴海洋油气钻井的成熟技术。除了需要考虑海洋环境及地质的特殊性(水深、风浪流、温变、窄安全密度窗口、浅层地质灾害等),针对性研发了深水钻井系统、深海动力定位系统、隔水管系统以及连续起下钻、双绞车、海底钻机和罐式钻探器等新型海洋钻探设备<sup>[49-51]</sup>,还需要克服深层地热开发带来的挑战:较长的水平井、高温和热效应、采出流体的化学成分以及生产速率或压力消耗等,都对地热井下套管和保温管、井身材料、设计和施工提出了更严苛的要求。许多学者和油气公司对高温高压环境下的深井(尤其是水平井)的建设、测井和材料等方面进行了探索:研发高温泥浆和井套管以增加长期井完整性,闭环系统热力学性质的研究与建模,利用不同的工质(如水和超临界 CO<sub>2</sub>)对不同的闭环井结构在各种地球物理条件下进行效率测试等。而且还开发了相关产品,例如,美国贝克休斯公司(Baker Hughes)开发、测试并现场部署了一个能在 300 °C 高温下工作的定向钻进系统,该系统由钻头、正位移马达和钻井液组成,该系统已在冰岛雷克雅内斯的深钻项目地热井中使用<sup>[52]</sup>。

## 3.2 海上地热资源评估技术

海洋地热资源的评估主要包括热储潜力评价、资源储量评价和资源开发利用评价。热储潜力评价的重点在于了解海底地热资源形成的地质条件,初步确定优质热储、热储物性、热储温度场及其空间展布;地热资源储量评价是在热储评价的基础上,对地热储层的温度、储量、流量等进行详细评价。地热资源储量评价方法很多,常用的有热储体积法、类比法、数值模拟法、解析法、统计分析法等<sup>[53]</sup>。其中,体积法与蒙特卡洛法相结合适用于静态地热资源量评价,数值模拟法可用于开采阶段的动态地热资源量评价,通过模拟地下热储中热水系统的运动,进行地热资源量的动态预测、开发设计及地热储层的动态监测等<sup>[54]</sup>;资源开发利用评价则是评价海洋地热资源的开发利用效益和可行性,并对开发海区地热资源打分、划分优先级和圈定等。

## 3.3 取热技术

海洋地热能的高效稳定地抽取是开发利用的重中之重,其原理是开采或利用天然赋存或人工注入的流体,从海底热储层中把热量转移,并输送到使用点。目前常用的人工传热介质是低温天然海水和 CO<sub>2</sub><sup>[39,42]</sup>。借鉴陆地地热的抽取技术<sup>[52]</sup>,海底取热技术基本分为 3 类:直接开采热储层的液体和气体、闭环地热系统和两者混合技术。第 1 类包括 2 种,若热储层里存在足量的天然流体,可直接利用(如热液口)或通过钻探地热井开采;如果热储层里只有有限的或没有天然流体,通过水力压裂法建立或重新激活现有的地下断裂系统,人为地产生或增强渗透性,吸收原位热量,然后将加热的水泵送到生产井,称作增强型地热系统(EGS)或干热岩(HDR)项目<sup>[19]</sup>。第 2 类没有流体被引入或从海底热储层中提取,也没有压裂,利用井下热交换器或密封井和管道循环流体,通过传导吸收热量并将地热能带到地表,即所谓的闭环地热系统(CLG),这种方式克服了渗透性和流动问题。最后一类结合 2 种技术,先使用 EGS 技术进行热储改造,再建设 CLG 系统,提升并获取高质量的海底地热能。

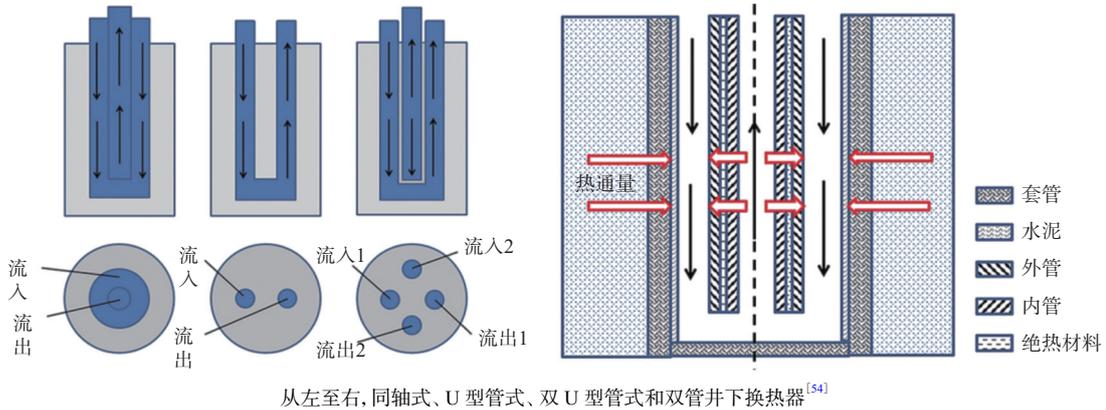
## 3.4 废弃油气井和平台改造技术

随着海上油气开发的深入,海洋油气设施退役弃置逐渐成为工程界和学术界的最大挑战之一,除了高昂处置费用,海上油气平台的报废处理还面临着安全、技术和环境等诸多方面的挑战<sup>[55-57]</sup>。许多废弃井都蕴含丰富的地热资源,将其改造成地热井二次利用是个很好的选择。不仅减少钻探地热井的成本、节省了处置费用,而且还可充分利用废弃的油气井、管道、泵、海上平台和其他基础设施,降低地热利用的成本,并降低了环境影响。

从废弃油气井中开采地热能需要将井改装成热交换器<sup>[58]</sup>。近年来,许多研究人员<sup>[59-61]</sup>从成本和可行性的角度,专注开环系统的研究,其目的是将油气储层用作地热流体储层。开环系统由至少一个注入井和一个提取井组成。流体通过注入井泵入储层,从周围的岩层中获取热量,然后通过提取井循环。另一种选择是使用闭环系统将油气井转换为热交换器<sup>[62-64]</sup>,通过安装各种类型的热交换器把废弃油气井改装成闭环系统,常见的井下换热器主要有同轴式、U 型管式、双 U 型管式和双管式

等 4 种(图 5), 其中 U 型管式和双管式井下换热器最为常见。闭环系统消除了渗透性风险、流体损失、矿物结垢、流体-矿物化学反应和诱发地震等开环系统的潜在问题<sup>[65]</sup>。然而, 闭环系统中流体和围岩之间的接触面积仅限于井筒壁, 地热潜力完全取决于围岩的温度、导热性和扩散性以及井筒的长度。

为了获取更多的海底地热能, 有研究提出可以增打水平井或改造废弃多分支径向水平井, 可使注入的流体在温度最高的井底长时间加热, 提高海洋地热采收效率<sup>[54]</sup>。此外, 海洋油气平台、管道和其他原有附属设施, 可以依据地热的开发用途进行改造, 比如安装地热发电装置等。



从左至右, 同轴式、U 型管式、双 U 型管式和双管井下换热器<sup>[54]</sup>

图 5 井下换热器类型

Fig.5 Type of geothermal well heat exchangers

### 3.5 热-电转换技术

尽管内陆地热发电技术得到了广泛发展, 但海上地热-电能转换技术仍然是概念性的。对于可以输出高压高温汽水混合物的海洋地热资源, 比如高温高压油气田、热液喷口, 可以在海洋平台和近岸陆地上使用闪蒸蒸汽发电系统<sup>[13,16]</sup>。对于中低温海底地热资源, 目前热-电转换大多采用有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)系统和温差发电器技术<sup>[10,12,14,27,66]</sup>。ORC 一般采用低沸点工作流体(对异丁烯、异戊烷、R-134a、氨等有机流体)作为循环工质, 将海底地热能传给工质产生高压气体, 推动涡轮机做功发电, 其主要组件包括蒸发器、冷凝器、涡轮机以及工作流体泵等(图 6)。目前对 ORC 系统的研究主要集中在有机工质选取、系统性能优化

和与其他系统联合运行等方面<sup>[67]</sup>。温差发电器基本原理是热电材料的塞贝克效应(图 7), 不同于先

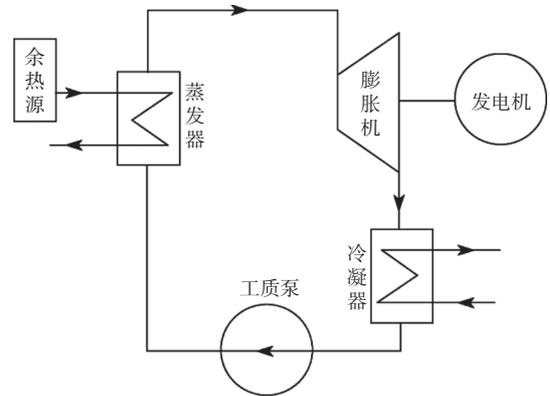


图 6 ORC 系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of ORC (organic Rankine cycle) system

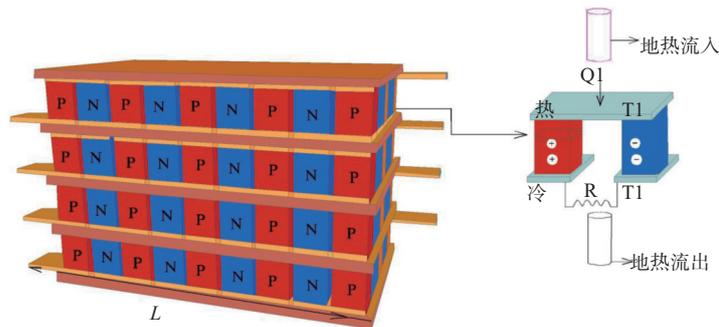


图 7 半导体温差发电器原理<sup>[27]</sup>

Fig.7 Schematic representation of thermoelectric generator with P-type and N-type semiconductors<sup>[27]</sup>

将地热能转换为机械能,再转换为电能的方式,半导体温差发电器直接将地热能转换为电能,提高了小温差海洋地热能的利用率,其性能的关键取决于型式和热电材料<sup>[27,68]</sup>。目前成熟的 ORC 系统的平均效率为 12%,而热电材料的转换效率介于 4%~5%<sup>[69]</sup>。此外,与其他可再生能源的联合发电技术也在探讨中<sup>[44]</sup>。

### 3.6 海上地热能开发环境影响评价技术

虽然海上地热能本身是一种无污染的可再生能源,但是无论何种利用方式都会对周边海洋环境产生一定影响。尤其是具有高热流的热液喷口和海山区的生态系统极其脆弱,被视为环境敏感地区,任何人类活动都有可能对这些地点的生物多样性产生重大影响,而且其中大部分被纳入海洋保护区的范畴。

海上地热开发项目的不同阶段都有可能不同程度地影响环境:在前期勘查阶段,测量船和仪器发出的噪音会短期影响游泳生物,钻探等取样活动会破坏底栖生物的栖息地;在施工和安装地热能利用设备阶段,通常会破坏海底地形和地层,造成底部悬浮体浓度升高,改变生境;在装备运行和维护阶段,相关大型装置和线缆的存在会改变周边的海洋动力,对海流造成持久阻碍和干扰。这些设备还可能会影响到海洋生物的自然运动或迁徙模式,若与之相撞,将构成重大威胁<sup>[70]</sup>。设备运行中产生的持续噪声和电磁场会干扰到某些海洋动物用于通信和导航的水下声音和地球磁场,从而影响到这些生物的生存,比如鲸鱼、海豚、鲨鱼、海龟和某些洄游鱼类<sup>[71]</sup>。此外,人类对海底热能的持续抽取,热通量的改变会对依赖其环境生存的生态系统带来深远且未知的变化,比如栖息地质量退化、生产力下降,局部多样性减少,群落结构的变化甚至物种灭绝等致命的影响。

因此,必须依据影响程度对海上地热能开发活动进行适当评估,由于这些影响有些是直接、短期的,有些是间接、长期的,所以不仅需要项目的直接和间接效应,还需要评估项目的累积效应。不同层面的影响评价仍可遵循目前广泛采用的评价框架,包括传统的环境影响评价(EIA)、侧重决策早期进行的长期影响评价的战略环境评价(SEA)、能够处理不确定性的生态风险评估(ERA)和对累积环境影响的生命周期评估(LCA)等。影响分析由 3 个主要层次组成,包括识别、评估和重要性<sup>[72]</sup>。

首先根据前期资料对环境影响可能的范围和关键因素进行筛选和界定,然后使用不同方法从不同层面进行分析评价,最后将这种分析扩展到整个潜在影响规模和程度的评估,给出具体结论和建议。评估常用工具和方法有检查表、矩阵、统计模型、数学模型、地图和地理信息系统等,获得的最终成果可以是定性的和定量的。

目前,关于海上地热开发影响评价的案例和研究极少。葡萄牙的研究团队针对直接利用从热液喷口排放的热能和通过在海山钻探生产井进行常规热能开采的 2 种情景(表 2),借助一个水动力模型的框架,利用拉格朗日粒子追踪、射流和三维水动力等模块建模,量化评估地热开发过程中产生的羽状流扩散和运移对环境的影响,结果表明,水平向可超过 70 km,垂向更大,并给出受影响的海域面积和物种类型及密度<sup>[73]</sup>,这种方法可为评价地热开采海域生境丧失、生境质量退化程度和物种恢复能力提供借鉴。

表 2 海上地热 2 种开发情景的评估输入参数<sup>[73]</sup>

Table 2 Inputs of parameters for assessment in two scenarios of marine geothermal occurrences<sup>[73]</sup>

开发情景	基础因子	影响因子
热液喷口区	排放量	液量的变化
	流体成分	流体成分的变化
	扩散面积	扩散面积的变化
	物种(密度和类型)	
海山区	海山面积	使用面积(设施占用)
	物种(密度和类型)	扩散面积(沉积物和流体)

## 4 中国海上地热开发利用的挑战和对策

中国是个海上地热资源大国,但长期重视程度不足,相关研究、规划和政策极少,需要从以下方面加强对海洋地热资源研究和开发,助力中国“双碳战略”目标的实现。

(1) 海上地热资源勘查程度低,需要加强资源评估工作

目前中国关于海洋区域地热资源的勘查评价的实测资料很少,许多区域处于空白,严重影响了中国对海洋地热资源的规划和开发。需要加强投入,加大海洋区域地热资源的勘查力度,尤其是渤海湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地和冲绳海槽盆地及周边海域等具有开发潜力且具有重要战略意

义的关键海区,查清中国海洋地热资源的分布规律及其储量,并进行热储潜力分级评价,建立中国海底地热资源数据库,为后期开采以及制定适于中国海上地热利用的范式提供基础数据和理论依据。

(2) 加强海上中低温地热利用技术和深海钻探技术的研发

虽然中国海洋地热的储量很大、分布广泛,但大多为中低温地热资源。目前用于中低品位热能资源开发利用技术主要是 ORC 系统和半导体温差发电技术,但这两项技术目前基本应用于陆地地热开发,而且组件大多依靠进口且成本较高,缺乏中国行业标准与政策支持。需要开展适宜中国海洋环境的中低温地热发电技术、“地热+多种能源”发电技术、地热综合利用技术等,并对设备进行国产化研发和替代。同时,中国深海和高温高压地热井钻探关键技术仍落后于国外,核心装备自主性、创新性不强,需要组织重大研发计划,协同攻关,加速赶超。

(3) 降低开发成本,探索具有市场化前景的海洋地热利用技术途径

钻井是海上地热项目的主要成本,对于陆地地热开发项目,钻探过程的成本相当于项目总成本的 42%~95%<sup>[74]</sup>,而海上钻探成本大约是陆地的 3~10 倍,所以成本是目前海洋地热利用的主要障碍。此外,中国可利用的海洋地热多为中、深层资源,开采成本会更高。需要探索具有市场化前景、成本较低的海洋地热利用技术途径,比如对海上废弃油气井和平台的地热开发改造和综合利用。中国渤海湾盆地海域内的油气平台分布与地热资源分布高度重叠,而且温度梯度普遍较高。同时,位于该海区的胜利油田所属部分海洋平台已开展弃置工作,并且未来几年还将有大量平台需要退役,该区域可以作为试点。建议管理部门出台海上地热发电扶持政策,调动相关企业的积极性,利用仍在生产或产能已经衰竭的海上油气平台开发地热资源。

(4) 加大海上地热开发活动对中国海洋环境影响的研究

作为新兴产业,海上地热开发活动会对中国海洋环境带来很多未知的风险,尤其对中国海底深部地质环境、水环境和生态环境,以及深水区的生态系统的影响过程和机理。所面临的环境挑战包括影响因素和过程的复杂性、数据获取和处理的难度、评价结果的不确定性等问题,需要提前开展针对性的研究,确定相关的环境影响。并参考国外海洋地

热利用相关环境影响研究成果和开发经验,提出适用中国海洋环境的海上地热开发策略、影响评估框架和量化标准,并制定环境风险应急预案。

## 5 结论及展望

(1) 海上优质高温地热资源一般分布在碰撞带、俯冲带和洋中脊等板块边缘带以及大洋板块内部热点或地幔柱所在区域,在某些边缘海盆地也存在具有开发潜力的中高地热资源。中国海上高温地热资源主要分布在南海、冲绳海槽及周边等具有丰富油气资源的盆地区域。海上地热深度开发的最佳区域是已开发的海上油气田、热液喷口和海山地区。

(2) 目前海上地热能的利用方式仍以提取地热水直接供暖供热为主,其深度开发方式的探索集中在发电、辅助海洋资源开发等方向。相比单一利用方式,对地热资源进行综合利用,可有效提高转化效率,减少能量损耗。海上地热开发关键技术主要包括海洋地热资源勘探和评估技术、取热技术、热电转换技术、废弃海洋油气井及平台改造技术和环境影响评价技术等。

(3) 迄今国内外海上地热资源深度利用成功案例极少,究其原因主要是陆地地热开发比海上更经济。不过近年来随着化石能源价格不断上涨和“碳中和”气候目标的提出,海上地热能研究的广度和深度不断加深,为未来实现规模化和市场化应用奠定了基础。基于中国海上地热多为中低温地热资源且勘查程度低的现实,需要加强海上地热资源评估和中低温地热开发技术研发,探索诸如海上废弃油气井及平台的地热开发改造和综合利用等,市场化前景广、开发成本低的海上地热利用途径,并加强海上地热开发活动对海洋环境影响的研究。

### 参考文献:

- [1] 滕吉文,张永谦,阮小敏. 发展可再生能源和新能源与必须深层次思考的几个科学问题:非化石能源发展的必由之路[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1115-1152.
- [2] 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.
- [3] DAVIES J H. Global map of solid earth surface heat flow[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4608-4622.
- [4] 张英,冯建赟,何治亮,等. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 190-198.

- [5] GLUYAS J, AULD A, ADAMS C, et al. Geothermal Potential of the Global Oil Industry[M]. *Renewable Geothermal Energy Explorations*, 2019; 1-11.
- [6] 姜素华, 张雯, 李三忠, 等. 西北太平洋洋陆过渡带新生代盆地构造演化与油气分布特征 [J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(4): 839-857.
- [7] 郝春艳. 陆海统筹下的中国大地热流分布格局与构造意义 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [8] 栾锡武, 张训华. 东海及琉球沟弧盆系的海底热流测量与热流分布 [J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 670-678.
- [9] 梁振君. 中国海上最大高温高压气田东方 13-2 气田投产 [N]. *海南日报*, 2020-11-26(A01).
- [10] AULD A, HOGG S, BERSON A, et al. Power production via North Sea hot brines[J]. *Energy*, 2014, 78: 674-684.
- [11] ODUMODU C F R, MODE A W. Geothermal gradients and heat flow variations in parts of the eastern Niger Delta, Nigeria[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2016, 88: 107-118.
- [12] HIRIART G, PROL-LEDESMA R M, ALCOCER S, et al. Submarine geothermics: hydrothermal vents and electricity generation[C]. *Proceedings World Geothermal Congress*, 2010: 1-6.
- [13] KARASON B. Utilization of offshore geothermal resources for power production[D]. Reykjavik: Reykjavik University, 2013.
- [14] ARYADI Y, RIZAL I S, FADHLI M N. Electricity generation from hydrothermal vents[C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016; 42.
- [15] YU X, WU S J, YANG C J. Generation of electricity from deep-sea hydrothermal vents with a thermoelectric converter[J]. *Applied energy*, 2016, 164: 620-627.
- [16] ARMANI F B, PALTRINIERI D. Perspectives of offshore geothermal energy in Italy[C]. *EPJ Web of Conferences: EDP Sciences*, 2013, 54: 02001.
- [17] PRABOWO T R, FAUZIYYAH F, BRONTO S. A new idea: the possibilities of offshore geothermal system in Indonesia marine volcanoes[C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 103: 1-15.
- [18] COSTELLO M J, CHAUDHARY C. Marine biodiversity, biogeography, deep-sea gradients, and conservation[J]. *Current Biology*, 2017, 27: 511-527.
- [19] 肖鹏, 窦斌, 田红, 等. 开采海洋区域干热岩的可行性探讨 [J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(8): 55-60.
- [20] 曲万隆, 邢同菊, 张建伟, 等. 东营黄河三角洲地热资源特征及其开发利用 [J]. *地质学报*, 2019, 93(S1): 212-216.
- [21] 温广连. 渤海石油基地地热直供配套水源热泵供暖模式应用分析 [J]. *区域供热*, 2014(5): 12-22.
- [22] 赵利军. 大连鲁能汤海洋温泉地热资源综合分析 [J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(6): 102-104.
- [23] 王峰, 雷霖霖. 半滑舌鳎工厂化循环水养殖模式能值评价 [J]. *中国工程科学*, 2015, 17(1): 4-10.
- [24] 张效新, 王淑生, 韩红梅, 等. 地热深井卤水配兑黄河淡水工厂化养殖凡纳滨对虾试验 [J]. *河北渔业*, 2016(1): 32-34.
- [25] 闫欣, 张成飞, 季本安, 等. 利用地下水进行金乌贼亲体越冬养殖技术 [J]. *科学养鱼*, 2020(12): 63-64.
- [26] AULD A, HOGG S, BERSON A, et al. Power production via North Sea hot brines[J]. *Energy*, 2014, 78: 674-684.
- [27] BANERJEE A, CHAKRABORTY T, MATSAGAR V. Evaluation of possibilities in geothermal energy extraction from oceanic crust using offshore wind turbine monopiles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 92: 685-700.
- [28] 唐晓旭. 海上稠油多元热流体吞吐工艺研究及现场试验 [J]. *中国海上油气*, 2011, 23(3): 185-188.
- [29] HUANG S J, CAO M, CHENG L S. Experimental study on the mechanism of enhanced oil recovery by multi-thermal fluid in offshore heavy oil[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 122: 1074-1084.
- [30] 王君, 范毅. 稠油油藏的开采技术和方法 [J]. *西部探矿工程*, 2006(7): 84-85.
- [31] 郭太现, 苏彦春. 渤海油田稠油油藏开发现状和技术发展方向 [J]. *中国海上油气*, 2013, 25(4): 26-30.
- [32] 朱旭晨, 刘汝敏, 王涛, 等. 地热能辅助开采海上浅层稠油方法可行性分析 [J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(6): 63-70.
- [33] 陈秋月, 王中华, 王婷, 等. 利用地热能提高稠油油藏采收率的探索与实践 [J]. *石油化工应用*, 2022, 41(6): 43-47.
- [34] 程聪, 姜涛, 匡增桂, 等. 天然气水合物系统特征及其对我国水合物勘查的启示 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 30-40.
- [35] 毛佩筱, 吴能友, 宁伏龙, 等. 不同井型下的天然气水合物降压开采产气产水规律 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(11): 168-176.
- [36] ULLERICH J W, SELIM M S, SLOAN E D. Theory and measurement of hydrate dissociation[J]. *AIChE Journal*, 1987, 33: 747-752.
- [37] YOUSIF M H, ABASS H H, SELIM M S, et al. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1991, 6: 69-76.
- [38] 宁伏龙, 蒋国盛, 汤凤林, 等. 利用地热开采海底天然气水合物 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(12): 136-138.
- [39] LIU Y, HOU J, ZHAO H, et al. A method to recover natural gas hydrates with geothermal energy conveyed by CO<sub>2</sub>[J]. *Energy*, 2018, 144: 265-278.
- [40] 孙致学, 朱旭晨, 刘垒, 等. 联合深层地热甲烷水合物开采方法及可行性评价 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 146-156.
- [41] 任红. 南海天然气水合物取样技术现状及发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(4): 89-93.
- [42] 王维希, 张春生, 吴颜雄, 等. 联合深海地热开采天然气水合物技术展望 [J]. *现代化工*, 2021, 41(9): 17-21.
- [43] CHEN X Y, DU X, YANG J, et al. Developing offshore natural gas hydrate from existing oil & gas platform based on a novel multilateral wells system: depressurization combined with thermal flooding by utilizing geothermal heat from existing oil & gas wellbore[J]. *Energy*, 2022, 258: 124870.
- [44] 何宏舟, 陈志强, 蔡佳莹. 海洋温差能和地热能联合发电系统 [P]. 中国专利: CN102644565B. 2013-09-25.
- [45] 刘松堂, 霍建玲, 杨磊, 等. 海底热流原位探测技术研究进展

- 及趋势[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(6): 104-112.
- [46] DAVIS E E, VILLINGER H, MC DONALD R D. A robust rapid-response probe for measuring bottom-hole temperatures in deep-ocean boreholes [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1997, 19: 267-281.
- [47] 刘松堂, 李宏源, 霍建玲, 等. 热毯式海底热流原位探测系统设计 [J]. 海洋技术学报, 2019, 38(4): 39-44.
- [48] 杨小秋, 曾信, 石红才, 等. 海底热流长期观测系统研制进展 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 427-447.
- [49] 窦玉玲, 管志川, 徐云龙. 海上钻井发展综述与展望 [J]. *海洋石油*, 2006, 26(2): 64-67.
- [50] 祝沛桢, 李政航, 程龙. 深海石油钻采机械发展现状及展望 [J]. 科技经济导刊, 2016(30): 58
- [51] 刘健. 我国海洋钻机设备发展路径研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 40-48.
- [52] FEDER J. Geothermal well construction: a step change in oil and gas technologies [J]. *Journal of Petroleum Technology*. 2021, 73(1): 32-35.
- [53] 王社教, 李峰, 闫家泓, 等. 油田地热资源评价方法及应用 [J]. 石油学报, 2020, 41(5): 45-56.
- [54] 饶松, 高腾, 肖红平, 等. 中国油区地热开发利用进展 [J]. 科技导报, 2022, 40(20): 65-76.
- [55] 刘怀增, 黄刚, 郝晓鹏, 等. 海洋石油平台拆除作业风险评估分析研究 [J]. *山东化工*, 2015(13): 103-104.
- [56] 邓宗成, 张颖, 栾忠庆. 海上石油平台及管线弃置的海洋环境保护研究 [J]. *油气田环境保护*, 2016(4): 56-58.
- [57] 张茂东. 我国海上退役油气平台再利用研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(7): 62-67.
- [58] SUI D, WIKTORSKI E, RØKSLAND M, et al. Review and investigations on geothermal energy extraction from abandoned petroleum wells[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, 9: 1135-1147.
- [59] KUREVIJA T, VULIN D. High enthalpy geothermal potential of the deep gas fields in central Drava basin, Croatia[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25: 30413052.
- [60] LUND J W, FREESTON D H, BOYD T L. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review[J]. *Geothermics*, 2011, 40(3): 159-180.
- [61] KHARSEH M, AL-KHAWAJA M, HASSANI F. Utilization of oil wells for electricity generation: performance and economics[J]. *Energy*, 2015, 90: 910-916.
- [62] BU X, MA W, LI H. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells[J]. *Renew Energy*, 2012, 41: 80-85.
- [63] TEMPLETON J D, GHOREISHI-MADISEH S A, HASSANI F. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy[J]. *Energy*, 2014, 70: 366-373.
- [64] ENGLISH J M, ENGLISH K L, DUNPHY R B, et al. An overview of deep geothermal energy and its potential on the island of ireland[J]. *First Break*, 2023, 41. 33-43.
- [65] MALEK A E, ADAMS B M, ROSSI E, et al. Electric power generation, specific capital cost, and specific power for advanced geothermal systems[C]. Stanford, California, USA: Proceeding of 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2021, 15-17.
- [66] GHOLAMIAN E, HABIBOLLAHZADE A, ZARE V. Development and multi-objective optimization of geothermal-based organic Rankine cycle integrated with thermoelectric generator and proton exchange membrane electrolyzer for power and hydrogen production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 112-125.
- [67] 黄雅婷, 陶乐仁, 黄理浩, 等. 有机朗肯循环系统研究综述 [J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(1): 57-62.
- [68] HINTERLEITNER B, KNAPP I, PONEIDER M, et al. Thermoelectric performance of a metastable thin-film Heusler alloy[J]. *Nature*, 2019, 576, 85-90.
- [69] WANG K, YUAN B, JI G, et al. A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 168: 465-477.
- [70] CLARK C W, ELLISON W T, SOUTHALL B L, et al. Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 395: 201-222.
- [71] COPPING A, BATTEY H, BROWN-SARACINO J, et al. An international assessment of the environmental effects of marine energy development[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 99: 3-13.
- [72] INGRAM D M, SMITH G H, BITTENCOURT-FERREIRA C, et al. Protocols for the equitable assessment of marine energy converters[M]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2011.
- [73] PEDAMALLU L R, NEVES R J, RODRIGUES N E, et al. Environmental impacts of offshore geothermal energy[J]. *Transactions*, 2018, 42: 825-834.
- [74] TESTER J, HERZOG H, CHEN Z, et al. Prospects for universal geothermal energy from heat mining[J]. *Science & Global Security*, 1994, 5(1): 99-121.

## Status quo of offshore geothermal energy development and its enlightenment to China

TIAN Zhenhuan<sup>1,2,3</sup>, WANG Houjie<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2,3</sup>, SHI Jinghao<sup>1</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250100, China; 3 Shandong Engineering Laboratory for High-Grade Iron Ore Exploration and Exploitation, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Under the background of world energy shortage and carbon emission reduction targets, with the progress of marine and geothermal energy development technology, the potential of offshore geothermal energy has attracted more and more attention. The distribution of hot spots in the development of offshore geothermal resources in the world, as well as the advantages and disadvantages of the utilization of offshore geothermal resources were analyzed. The status quo and key technologies of offshore geothermal resources exploration were summarized, including offshore geothermal utilization strategy, geothermal exploration technology, geothermal resource evaluation technology, geothermal utilization technology and the environment impact evaluation technology, ect. It is pointed out that there are many challenges in the development and utilization of offshore geothermal energy in China, such as weak basic data, insufficient innovation of key technologies, poor autonomy of core equipment, and imperfect incentive policies, etc. At last, the corresponding development suggestions are given.

**Key words:** offshore geothermal energy; offshore geothermal power generation technology; offshore geothermal energy extraction technology; reconstruction of abandoned oil and gas wells; environmental impact assessment