DOI 10.15302/J-SSCAE-2021.06.007

温差能与低温海水资源综合利用研究

付强[1]，王国荣[2]，周守为[1]，钟林[2]，张理[3]，余兴勇[2]，杨浦[3]

（1. 中海油研究总院有限责任公司，北京 100028；2. 西南石油大学机电工程学院，成都 610500；
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室（湛江），广东湛江 524013）

摘要：我国海洋温差能资源量巨大，主要分布在广东省和南海海域，是区域能源结构优化以实现碳达峰、碳中和的有效支撑，也是未来我国南海、21 世纪海上丝绸之路沿线诸多岛屿能源补给保障的重要途径；目前海洋温差能发电（OTEC）技术和装备尚处于实验阶段，兆瓦级试验电站建设成本巨大，整体技术成熟度不及商业级利用规模，亟待发展突破。本文总结了国内外 OTEC 及综合利用的发展模式、技术装备所面临的挑战，针对南海温差能资源开发困境、广东省液化天然气（LNG）冷能资源浪费等情况，提出了以 LNG 气化的低温海水替代深层海水进行温差能发电的新途径。建议以珠海 LNG 气化站为例，探索 LNG 冷能回收 – 温差能发电、低温冷海水综合利用示范基地的发展模式；通过初步概算示范基地的投资与收益，完成了相应模式的经济与技术可行性论证。相关发展模式建议、应用案例论证过程，可为我国温差能与低温海水资源综合利用提供技术借鉴和应用参考。

关键词：海洋温差能；低温海水资源；LNG 冷能；综合利用；温差能发电
中图分类号：TE1　　**文献标识码：**A

Comprehensive Utilization of Temperature Difference Energy and Low-Temperature Seawater Resources

Fu Qiang[1], Wang Guorong[2], Zhou Shouwei[1], Zhong Lin[2], Zhang Li[3], Yu Xingyong[2], Yang Pu[3]

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhanjiang), Zhanjiang 524013, Guangdong, China)

Abstract: China has a huge amount of ocean temperature difference energy resources that are primarily distributed in Guangdong Province and the South China Sea. These resources are crucial for optimizing the energy structure of Guangdong Province and for ensuring the energy supply of islands in the South China Sea and along the 21st Century Maritime Silk Road. Currently, the ocean thermal energy conversion (OTEC) technology and equipment are still in the experimental stage worldwide. The construction cost of megawatt-level experimental power stations is huge, and its overall technologies are not mature enough for commercial utilization; therefore, breakthroughs in related technologies and equipment are urgently needed. In this article, we summarize the development mode of OTEC and the challenges faced by related technologies and equipment in China and abroad. We propose a new approach

收稿日期：2021-05-31；**修回日期：**2021-08-10
通讯作者：周守为，中海油研究总院有限责任公司研究员，中国工程院院士，研究方向为海洋油气开发技术装备；
E-mail: zhoushw@cnooc.com.cn
资助项目：中国工程科技发展战略广东研究院咨询项目“海洋能与深层海水资源综合利用战略研究”(2019-GD-15)；南方海洋科学与工程广东省实验室（湛江）项目 (ZJW-2019-05)
本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

of using low-temperature seawater—produced during the gasification of liquefied natural gas (LNG)—instead of deep seawater to generate electricity; this can help overcome the difficulties regarding the temperature difference energy development in the South China Sea and address the waste of LNG cold energy resources in Guangdong Province. Specifically, we use the Zhuhai LNG gasification station as an example to explore a development model of integrating LNG cold energy recovery with OTEC and the establishment of a low-temperature seawater comprehensive utilization demonstration base. Moreover, we demonstrate the economic and technical feasibility of the model through a preliminary estimate of the investment and revenue of the demonstration base. This case is expected to provide necessary technical references and application demonstrations for the comprehensive utilization of temperature difference energy and low-temperature seawater resources in China.

Keywords: ocean temperature difference energy; low-temperature seawater resources; liquefied natural gas cold energy; comprehensive utilization; temperature difference power generation

一、前言

海洋温差能是一种稳定且储量巨大的可再生能源，经济高效地进行开发是世界清洁能源发展的潜力方向之一。我国近岸海洋能资源潜在量约为 6.97×10^8 kW，60% 以上分布在南海；其中温差能技术可开发量占比高达 34%，具有稳定、全时段、可再生等优点 [1,2]。然而，温差能发电技术和设备复杂程度高、建设及运行成本高、投资回报周期长、整体技术成熟度不及商业级利用规模，这些问题导致海洋温差能电站发展受到严重制约 [3,4]。世界海洋强国多年来持续保持资源投入，以促进海洋能技术的研发与应用。

目前，我国在温差能及低温海水利用研究方面尚处于起步阶段，技术与应用研究空间广阔 [5]。一方面，海洋温差能发电（OTEC）的技术装备尚不成熟，深层低温海水取水装置及建设成本占到整个温差能发电装置的 50%，投资回报率偏低；另一方面，我国液化天然气（LNG）冷能资源浪费较为严重，利用率最高的冷能发电技术国产化水平不高，核心技术装备水平落后于发达国家。例如，广东省作为 21 世纪海上丝绸之路的重要支点，毗邻南海具有地理优势，海洋能资源丰富 [6]；截至 2020 年年底，已有 6 座大型 LNG 气化站投产运营，年接收 LNG 能力超过 1×10^7 t，每吨 LNG 在气化成天然气过程中可产生约 240 kW·h 的冷能，但大部分冷能以海水外排方式被直接浪费，还可能造成周边环境冷污染与生态破坏 [7~9]。

在温差能开发技术及装备的发展过程中，温差能发电及综合利用的复杂程度最高，涵盖温差能制冷、海水淡化、金属提取、食品保健等细分方向；相关前沿技术多处于实验阶段，示范电站规模还停留在百千瓦级，技术及装备的成熟度未能满足商业化要求。因此，在当前温差能发电理论研究、室内实验与小试原理样机验证可行的基础上，适时开展温差能发电、LNG 冷能回收综合利用中试基地建设，既可促进我国温差能发电技术装备水平提升，也能回收处于大量浪费状态的 LNG 冷能；在降低 CO_2 排放量的同时，为未来大型商业级温差能发电技术与装备的发展提供坚实支撑，为我国温差能与低温海水资源综合利用提供技术与应用示范。

二、海洋温差能发电的研究进展

（一）概念提出与应用探索

OTEC 基本原理指，利用海洋表面的温海水加热低沸点液体工质并使之气化，或通过降压使海水气化，然后将高压气体输送到透平机做功；透平机旋转并带动发电机转动发电，高压气体转变为低压气体；最后利用从海底提取的冷海水将做功后的乏汽冷凝，使之重新变为液体，从而形成系统循环 [10]（见图 1）。

1881 年，法国人 Arsonval J D 提出了 OTEC 概念。目前海洋温差能开发利用技术取得了突破性、实质性进展 [10]。从世界各国尤其是美国、日本的发展历程来看，阶段划分如下：第一阶段（20 世纪 80 年代开始），完成了温差能发电技术验证，建立了千瓦级发电样机，为大型化电站发展积累经验，以美国 50 kW Mini-OTEC、日本鹿儿岛 50 kW 试验电站为代表 [11,12]；第二阶段（20 世纪 90 年代开始），完成了百千瓦级样机制造、示范电站建

设，如美国在夏威夷分别建造了 210 kW 岸基试验电站、100 kW 示范电站，后者在 2015 年实现并网发电 [13,14]；第三阶段（当前），探索深层海水资源综合多级利用以期降低发电成本，日本研究进展较快，建立了离岛温泉水 – 海洋深层水发电模型、久米岛深层水多级利用模型 [15,16]；第四阶段（未来），建立商业级大型电站，以温差能发电为主，涵盖海水淡化、海水制冷、食品开发、农业、养殖业、医疗保健等方面的产业开发，向着高技术含量、高附加值的综合开发模式演进 [17]。目前，我国正处于第二阶段，完成了功率为 15 kW 的 OTEC 系统研制，但尚未建立示范电站，相关技术及装备相比世界先进水平差距明显 [18]。

以美国、日本、法国为代表，众多海洋强国积极开展海洋温差能开发利用研究，建成了多座海洋温差能示范电站并试运行。也要注意到，当前已建成的 OTEC 项目，装机规模普遍较小（最大为 1 MW 透平发电机组），都处于示范运行阶段，实现商业化开发仍需突破效率偏低的瓶颈问题。在当前技术水平条件下，温差能电站单机功率低、建设运行成本高，特别是冷水源成本居高不下（深层海水取水设施相关费用约占总成本的 40%~50%），温差能电站的经济性明显低于同级别装机容量的海上风力发电项目。

（二）海洋温差能发电的关键技术

1. 循环技术

温差能发电效率取决于系统的循环方式。按工质和流程的不同分为开式循环、闭式循环、混合式循环，其中闭式循环最为成熟，基本达到商业化水平 [19]；在闭式循环系统的基础上，发展了朗肯循环、Kalina 循环、上原循环及相应的改进方案，循环热效率提高到了 5% 左右。国内机构在 Kalina 循环的基础上，发展了国海循环、中国海洋大学新循环，循环热效率为 4.17%，但仍处于室内实验阶段 [10]。整体来看，国内循环方式研究与国际先进水平存在差距，尤其缺乏温差能电站的实际应用经验。

2. 大直径冷水管制造、安装及管理技术

长距离深海管道的设计、制造、铺设与管理，一直是 OTEC 系统的技术难点，也是主要的成本来源 [4]。美国马凯公司针对夏威夷海洋温差能示范电站的工程需求，开发了高密度聚乙烯大直径管道以及相应的系泊系统、铺设方案；管道取水深度达 1000 m，管径达 10 m，水中质量超过 2300 t；后续

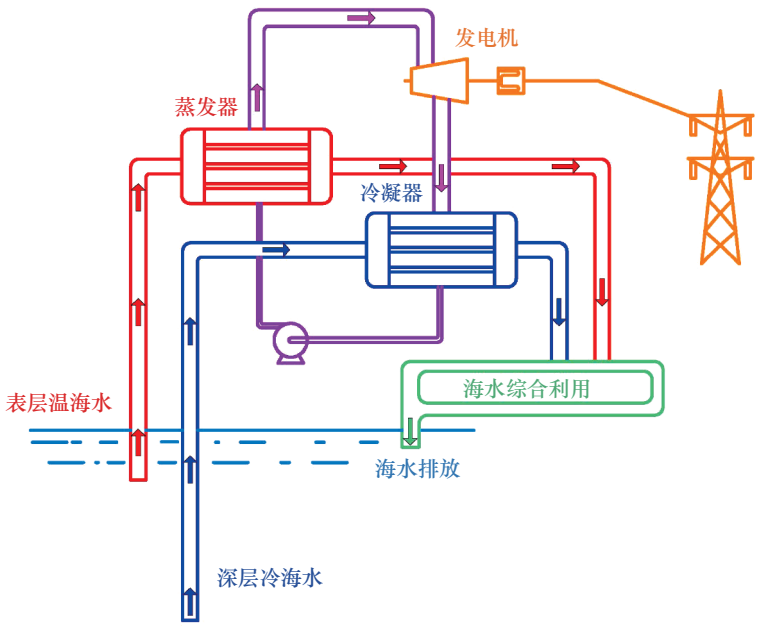

图 1　海洋温差能发电系统原理

联合美国洛克希德·马丁公司研发了强度更高、耐久性更好的连续增强型玻璃纤维取水管 [5,14]。我国尚未关注此方面的技术研发，导致技术积累匮乏，不足以支撑大型电站工程建设。

3. 多极综合利用技术

温差能发电抽取的低温深层海水包含了温差能、各类物质资源，多阶段地开展资源利用，既可解决资源闲置问题，还能产生经济效益，产业发展空间广阔 [20]。日本对深层海水的利用最为成熟，提出了离岛海洋深层水 – 温泉水、久米岛温差能利用模型等；发电之外的其他收益达到 25 亿日元 / 年 [16]。国内的相关研究处于起步阶段，鲜有公开报道。

4. 高效工质选用技术

海洋温差发电的温差一般保持在 20 ℃左右，应寻找适合这种小温差工况的工质以有效提高循环的热效率 [10]。国外已建成的温差能示范电站，使用过的工质有 R22（氟利昂）、R717（氨）、R32（二氟甲烷）等，其中 R717 被视为相对理想的工质类型 [21,22]。国内机构虽然提出 R125/R600A（1∶1）混合工质、液化石油气（LNG）替代工质等方案，但已建成或设计中的温差能样机基本采用 R717 [23]。新型高效工质研究难度较大，国内多为实验研究，缺乏实际应用的平台和经验。

（三）海洋温差能发电的关键装备

1. 换热器

换热器（含冷凝器、蒸发器）是影响 OTEC 系统循环效率的关键因素之一。日本佐贺大学研究团队针对板式换热器进行了大量试验和数值模拟，在 Xenesys 公司的协助下开发了钛材料板式换热器，循环效率提高约 10%，冷、热水流量均达到 3300 m^3/h 的设计值 [24]。自然资源部第一海洋研究所完成了 SOS316L 材料板式换热器设计，冷、热水流量分别为 129 m^3/h、125.3 m^3/h [25,26]；后续将进一步提高换热器的效率指标。

2. 透平机

透平机作为 OTEC 系统的动力输出环节，对发电系统性能起着决定性作用。自然资源部第一海洋研究所牵头开展了 10 kW 小型海洋温差发电透平机研究，但在大型商业化透平装置方面与国际先进水平存在较大差距 [27]。

三、我国海洋温差能资源分布与研究情况

我国大陆海岸线长度超过 18 000 km，岛屿和半岛众多，包括渤海、黄海、东海、南海在内的海洋总面积约为 4.7×10^6 km^2，除南海外的其他海域水深普遍只有数十米。海洋水温具有明显的地区差异和季节性变化：渤海、北黄海易受大陆气候的影响，南黄海、东海处于近岸海流系统与外海海流系统的汇合区域，水温情况主要受海流的影响；南海处于亚热带与热带，终年温度较高，水温分布具有明显的热带深海特征。南海表层水温冬夏一致，除北部沿岸外的大部分区域水温为 28.6 ℃；100~300 m 深度的次表层水温为 12~20 ℃；500~800 m 深度的深层水温在 5 ℃以下；1000 m 深度以下的海盆区深层水温最低为 2.36 ℃，无季节变化，开发利用条件良好。

我国海洋温差能理论装机容量为 3.67×10^8 kW，约占我国海洋能总量的 50%；技术可开发装机容量为 2.57×10^7 kW，按 2% 的利用率计算，年发电量超过 5.7×10^9 kW·h [28]。南海海域的温差能资源占我国蕴藏总量的 96%（根据估算可减排温室气体超过 5×10^9 t/a），蕴藏量的分布特点是：春季温差能蕴藏量较小，集中在中部，西沙群岛附近海域蕴藏量占比较高；夏、秋两季蕴藏丰富，集中在中部、东部水深较大的区域；冬季蕴藏量小，整体分布较为均匀，东沙群岛附近海域因暖水层厚度增加而具有最高的温差能蕴藏量。

我国海洋温差能储量比较丰富，但技术关注少、工作起步晚，相关基础与应用研究明显滞后于海洋强国。当前的工作集中在循环理论方面，海洋温差能开发处于实验室理论研究及试验阶段，主要研究机构有中国科学院、国家海洋局、中国海洋大学、中国海洋石油集团有限公司、天津大学等。

四、LNG 冷能回收与低温海水资源综合利用基地方案构想

（一）回收 LNG 冷能发展温差能实验电站

LNG 在输送给用户使用前需提前气化，通常以表层海水作为热源；气化后的海水相较于海洋表层海水温差较大，可利用气化器排出的冷海水

作为温差能发电的冷水源。相较于深层冷海水，LNG 冷能具有更为稳定的全天候供应能力，易于控制调节；相比利用海水温差，基于 LNG 冷能的海洋温差能电站冷量调控更加灵活，发电稳定性更优。

LNG 冷能 – 海洋温差能实验电站，可作为温差能发电技术的实验平台，推动我国温差能利用核心技术的突破和积累，稳步缩小与国际先进水平的差距，相应基地方案构想如图 2 所示。依托该方案，可探索温差能发电系统的高效循环方式，测试换热器性能，论证发电系统经济性，测试新技术新装备性能，探索海水空调制冷、海水淡化等综合开发利用模式。

（二）深层海水综合利用基地方案的必要性

深层海水包含温差能、各类物质资源，目前大部分深层海水利用都是单一目的，用后废弃（仅一级利用）而造成巨大的资源浪费。单一利用方式面临深层取水设施建造的高成本问题（约占总成本的 40%~50%），相应产业模式不具有成本优势，发展规模受到制约。此外，单一利用方式可能会对环境造成影响，如未能利用的营养盐类将不可避免引起海岸富营养化现象，排放的冷水干扰海洋生态平衡。

解决深层海水利用中的资源闲置问题，就是要充分利用海水包含的各类资源，使其在综合利用之后具有与地表水相似的特性（再将其排回大海）。因此，深层海水的多级综合利用是应有之义，宜在储备海洋温差能电站技术的基础上，进一步建设综合利用基地（见图 3），包括冷 / 热海水取水设施、换热实验平台；依托基地，建立兆瓦级海洋温差能示范电站、海水空调示范项目、海水淡化示范项目；在水资源利用方面，探索综合利用策略及路线，布局深层海水冷能开发 – 水资源综合利用产业链，为在中长期建成海洋能及深层海水开发实验基地奠定基础。

五、我国温差能发展方向及低温海水资源利用产业分析——以广东省为例

（一）能源需求及政策情况

截至 2020 年年底，广东省全社会用电量为 6.926×10^{11} kW·h，居全国首位；省内机组发电量为 4.78×10^{11} kW·h，呈现明显的供不应求态势 [29]。广东省各类机组中，包括煤电、气电等在内的火电仍是主要的发电模式。面向未来应用需求，应积极发展稳定可靠、成本低廉、清洁环保的电力供给。

在政策层面，《广东省加快发展海洋六大产业行动方案（2019—2021 年）》提出，实施海洋电子信息、海上风电、海洋生物、海洋工程装备、天然气水合物、海洋公共服务等产业发展行动计划方案，推动海洋经济高质量发展，全面建设海洋强省 [30]；《广东省 2020 年度碳排放配额分配实施方案》明确，年度配额总量为 4.65×10^{8} t [31]，间接体现了对新型

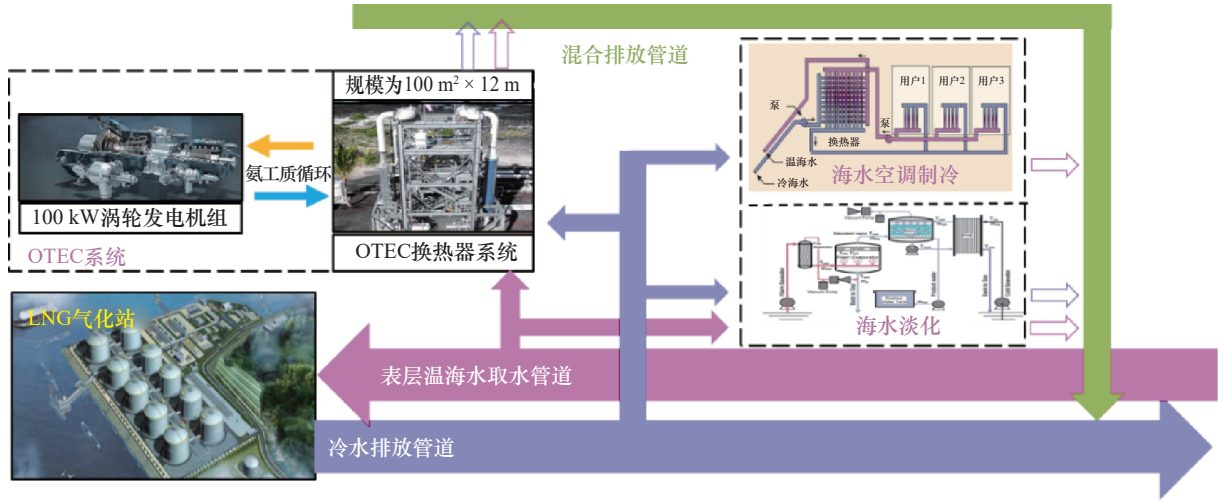

图 2　LNG 冷能回收 – 温差能电站实验基地构想方案

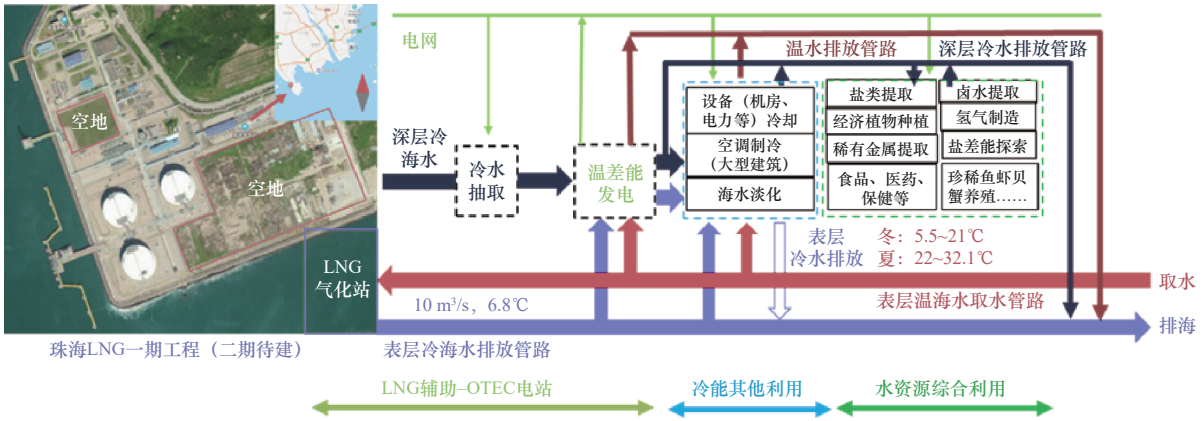

图 3　深层海水综合利用基地规划示意图

电力供给需求的迫切性。在此背景下，温差能发电作为海洋清洁可再生的能源类型，将有机会获得能源行业和社会发展层面的高度关注。

（二）资源量及开发基础

广东省海洋能主要为波浪能、盐差能、温差能，其中温差能占比最大；特别在省内东南海域，年温差能密度达 5×10^9 J/m³，可全年进行有效开发，装机容量相当于 3 个“华龙一号”核电站，发展前景可观 [32]。与此同时，广东省 LNG 产业发达，气化站数量位居全国第一，保守预计至 2022 年年末 LNG 气化站合计年接收规模为 2.1×10^7 t。以珠海 LNG 气化站为例，截至 2020 年 6 月，累计进口总量超过 1×10^7 t，总计产生冷能约 2.42×10^9 kW·h，若成功回收相当于节省用煤 9.68×10^5 t、减排 CO_2 2.42×10^6 t [33,34]。

广东省海洋生产总值连续多年位居全国首位，是我国海洋经济发展的核心区域。根据 2020 年广东海洋经济发展报告，2019 年广东省海洋生产总值为 21 059 亿元，同比增长 9%，占地区生产总值的 19.6%，占全国海洋生产总值的 23.6%；在海洋工程技术、装备制造研发、海洋新能源开发利用、科技服务资源共享平台等方面具有良好的基础，代表了国内先进水平 [35]。

因此，在广东省开展 LNG 冷能回收 – 温差能发电、深层海水资源综合开发，具有良好的技术经济合理性；通过率先建设试验电站，解决温差能发电关键技术和装备短板，积累研发与应用经验，推动我国中长期大规模商业化电站的发展。

（三）经济可行性分析

1. 发电效益分析

日本久米深水综合利用计划（2017 年）建造的兆瓦级（1250 kW）温差能电站 [16]，是开展相关经济可行性分析的良好参照：在温差能电站成本中，冷 / 热水取水设施占比约为 40%~50%，换热器占比约为 30%，发电及配套设施占比约为 20%。

LNG 接收站自建的泵站、水处理、高低温海水管道等设施，可沿用到 LNG 气化。以珠海 LNG 接收站为例（见表 1），若依托其建设兆瓦级温差能示范电站，可节省抽取深层海水相关设施投资约 5000 万元，为商业级温差能发电技术与装备研发提供实验平台，兼作冷能回收利用示范。

基于珠海 LNG– 温差能电站无需新建低温海水取水设施的前提，可以节省 50% 的建设成本；估测电站最大功率可达 1250 kW，考虑电站运行过程中各环节能量损耗，并假设最终可转换电能的比例为 2%，则电站发电量为 1.7×10^7 kW·h/a；考虑电站自身运转的能源消耗，假设电能净输出占比为 50%（即发电净输出为 8.5×10^6 kW·h/a），以电价 0.5 元 /（kW·h）计算，该电站年收益为 425 万元。温差能电站发展初期建设成本高昂，由于过多专用设备的设计生产，美国夏威夷百千瓦级岸基式示范电站的地面建设费用折合 3200 万元 [13]。在珠海现有气化器基础上进行温差能电站建设，为了实现样机实验过程中表层海水温度与气化器排水温度常年维持在 20 ℃左右，需对现有气化器进水量进行调控，增添设备成本约 1000 万元，则电站总建设成本约 2600 万元（3200 万元 ×50%+1000 万元），据此估

表 1　珠海 LNG 气化站基本参数 [34]

参数名称	指标
LNG年处理量	3.50×10^6 t
气化排出海水与表层海水温差	3~7 ℃
夏季海域水温	22~32.1 ℃
冬季海域水温	15.5~21 ℃

算需 6 年收回成本。

建设试验性电站的主要目标是促进 OTEC 技术发展，加快 OTEC 技术储备。因此从平衡投资效益的角度出发，建议优先开展百千瓦级电站建设，在实现技术目标的同时显著减少投资规模。

2. 综合利用效益分析

通过回收 LNG 冷能，可低成本地开展海洋温差能利用，探索示范基地发展新模式，直接减少碳排放；待温差能利用技术成熟后，融入深层海水综合利用的诸多环节，提高产业的综合经济效益。在 LNG 冷能回收 – 温差能电实验站的基础上，增设深层冷海水的取水设施，抽取天然深层海水用于发电、制冷、水资源的多级利用，即可建立深层海水综合利用示范基地。例如，日本久米深水综合利用发展模式，建设费用预计为 5.3 亿元，而年度总盈利可达 5 亿元，设计收回成本仅需 2 年（见表 2）。

广东省宜借鉴国际先进经验，采取“三步走”发展策略：①复制现有发展模式，如制冷、海水淡化等；②吸收技术并扩展业务，如金属提取、高经济价值渔业、海藻生产、食品、保健、美容等；③研究未来需求明确、附加值高的业务方向，储备盐差能、生物利用等技术。该综合利用基地建成后，将进一步提升广东省在我国海洋经济发展领域的示范作用，推动广东省海洋传统产业结构调整。以广东省综合利用示范基地为依托，将深层海水冷能开发 – 水资源综合利用模式辐射至南海，成为海洋能产业技术的输出基地；推动我国掌握海洋能开发领域技术制高点，提升海洋能开发的国际影响力。

六、结语

本文总结了国内外 OTEC 及综合利用的发展模式、技术装备面临的挑战，针对南海温差能资源分布情况、广东省 LNG 冷能资源浪费现状，探讨了

表 2　日本久米深水综合利用模式效益 [15]

项目	产出	产业占比
抽取海水量	6.57×10^7 t/a	—
OTEC功率	1250 kW	—
水产养殖	2.06 亿元	41.2%
食品、饮料	1.91 亿元	38.2%
化妆品、医疗	0.79 亿元	15.8%
农业利用	0.18 亿元	3.6%
健康保健、医疗设施	0.06 亿元	1.2%
年度总盈利	5 亿元	100%

以 LNG 冷能替代深层冷海水进行温差能发电的新途径。以珠海 LNG 气化站为例，分析了 LNG 冷能回收 – 温差能发电、低温冷海水综合利用示范基地发展模式，提出了开发新型技术装备、探索低温海水多级利用等未来重点发展方向建议。相关内容在为 OTEC 及综合利用技术与装备研究提供参考的同时，也期望为我国南海边远海岛的能源供给提供新思路，促进南海区域成为 21 世纪海上丝绸之路的重要区域和关键支点。

我国 OTEC 技术与装备水平亟待快速提升，电站建设经验需要逐步积累；应适时启动试验性电站建设并发挥示范作用，广东省可在一过程中发挥积极作用。为此，建议依托现有产业基础，整合优势资源，重点开发海洋温差能、深层海水资源，相关举措如下。

一是合理提供财政税收、项目审批、土地利用等方面的政策支持。鼓励海洋温差能、LNG 冷能开发，提升温差能技术装备水平，培育深层海水利用产业；统筹论证深层海水发电和中长期开发利用，纳入沿海边远地区经济振兴支持范畴，促进我国新型绿色能源的规模化开发应用。

二是持续保持原始创新力度，加强重点和关键领域温差能利用的技术研发，适时制定温差能综合利用产业集群发展规划。到 2025 年，完成规划编制，实现技术设备整体国产化，单机功率达到兆瓦级；到 2035 年，初步建成温差能产业体系，单机功率达到 10 兆瓦级；到 2050 年，建立完善的温差能利用产业链，实现温差能的大规模商业开发。

三是发挥广东省的产业基础优势，建立温差能与低温海水资源综合利用示范基地。积极布局深

层海水冷能开发 – 水资源综合利用产业链，面向全国发挥示范和辐射作用（尤其是南海及其他岛礁），形成温差能发电及深层海水综合利用工程建设能力，服务 21 世纪海上丝绸之路倡议。

参考文献

[1] 深圳市中投顾问股份有限公司. 2016—2020年中国海洋能行业投资分析及前景预测报告 [R]. 深圳: 深圳市中投顾问股份有限公司, 2016.
Shenzhen Sino-investment Consulting Co., Ltd. Investment analysis and prospective forecast report of China marine energy industry 2016—2020 [R]. Shenzhen: Shenzhen Sino-investment Consulting Co., Ltd.

[2] 张继生, 唐子豪, 钱方舒. 海洋温差能发展现状与关键科技问题研究综述 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 55–64.
Zhang J S, Tang Z H, Qian F S. A review of recent advances and key technologies in ocean thermal energy conversion [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 55–64.

[3] 岳娟, 于汀, 李大树, 等. 国内外海洋温差能发电技术最新进展及发展建议 [J]. 海洋技术学报, 2017, 36(4): 82–87.
Yue J, Yu T, Li D S, et al. Study on the up-to-date progress and suggestions for ocean thermal energy conversion technologies [J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(4): 82–87.

[4] 井上興治, 大内一之, 實原定幸. 離島における海洋深層水を利用した温泉水バイナリー発電の研究 [J]. 海洋深層水研究, 2015, 16(1): 1–8.

[5] 兰志刚, 于汀, 焦婷, 等. 基于专利信息的海洋温差能发电技术成熟度预测及关键技术领域分析 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(6): 185–190.
Lan Z G, Yu T, Jiao T, et al. Maturation prediction and key technology field analysis of ocean temperature difference energy generation technology based on patent information [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(6): 185–190.

[6] 詹文欢, 姚衍桃, 孙杰. 广东省海洋环境资源基本现状 [M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
Zhan W H, Yao Y T, Sun J. Basic status of marine environment and resources in Guangdong Province [M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.

[7] International Gas Union. 2020 world LNG report [EB/OL]. (2020-05-20)[2021-05-31]. https://www.igu.org/wp-content/uploads/2020/04/2020-World-LNG-Report.pdf.

[8] 袁童. BOG处理与LNG再气化过程的能量匹配研究 [D]. 大连: 大连理工大学(硕士学位论文), 2020.
Yuan T. Study on energy matching between BOG treatment and LNG regasification process [D]. Dalian: Dalian University of Technology(Master's thesis), 2020.

[9] 刘伟民, 麻常雷, 陈凤云, 等. 海洋可再生能源开发利用与技术进展 [J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 1–18.
Liu W M, Ma C L, Chen F Y, et al. Exploitation and technical progress of marine renewable energy [J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(1): 1–18.

[10] 薛海峰, 刘延俊, 侯云星, 等. 海洋温差能闭式循环的研究与进展 [J]. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 109–121.
Xue H F, Liu Y J, Hou Y X, et al. Study and development of closed-cycle systems of ocean thermal energy conversion [J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(6): 109–121.

[11] Owens W L, Trimble L C. Mini-OTEC operational results [J]. Journal of solar Energy Engineering, 1981, 103(3): 233–240.

[12] Lennard D E. Ocean thermal energy conversion: Past progress and future prospects [J]. IEE Proceedings A(Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews), 1987, 134(5): 381–391.

[13] 苏佳纯, 曾恒一, 肖钢, 等. 海洋温差能发电技术研究现状及在我国的发展前景 [J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 84–98.
Su J C, Zeng H Y, Xiao G, et al. Research status and prospect of ocean thermal energy conversion technology [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(4): 84–98.

[14] Hartman D J. Makai connects world's largest ocean thermal plant to U.S. grid [EB/OL]. (2015-08-10)[2021-05-31]. http://www.makai.com/makai-news/2015_08_29_makai_connects_otec/.

[15] 高橋正征. 日本における海洋深層水の利活用の過去·現在·未来 [J]. 海洋深層水研究, 2019, 19(3): 149–157.

[16] 山城保雄. 久米島海洋温度差発電複合利用 [J]. 海洋深層水研究, 2010, 11(1): 1155–120.

[17] 中村幸雄. 多段利用にチャレンジする久米島モデル [J]. 海洋深層水研究, 2017, 18(3): 210–211.

[18] 陈凤云, 刘伟民, 彭景平. 海洋温差能发电技术的发展与展望 [J]. 绿色科技, 2012 (11): 246–248.
Chen F Y, Liu W M, Peng J P. Development and prospect of ocean thermoelectric power generation technology [J]. Journal of Green Science and Technology, 2012 (11): 246–248.

[19] 王义强. 海洋温差发电上原循环系统的研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学(硕士学位论文), 2011.
Wang Y Q. Research on the primary cycle system of marine thermoelectric power generation [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology(Master's thesis), 2011.

[20] 李明杰, 李军. 国外深层海水开发利用现状及未来我国开发设想 [J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(5): 52–55.
Li M J, Li J. Status quo of deep sea water development and utilization abroad and future development plan in China [J]. Ocean Development and Management, 2012, 29(5): 52–55.

[21] 封光, 钟爽. 海洋温差发电的研究现状与展望 [J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(2): 72–77.
Feng G, Zhong S. Research review and prospect of the ocean thermal energy conversion [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2011, 31(2): 72–77.

[22] 李大树, 张理. 海洋温差发电系统蒸发压力及工质优选分析 [J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 1101–1106.
Li D S, Zhang L. Numerical analysis on evaporating pressure and working fluids of ocean thermal energy conversion [J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(7): 1101–1106.

[23] 陈建新, 胡芃, 陈则韶, 等. R125/R600a二元混合物的热力学性质 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(4): 553–556.
Chen J X, Hu F, Chen Z S, et. al. Thermodynamic properties of R125/R600a binary mixtures. [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(4): 553–556.

[24] 人民网. 全球唯一处于运转状态的海洋温差发电设备 [EB/OL]. (2013-04-02)[2021-05-31]. http://finance.people.com.cn/

n/2013/0402/c348883-20999640.html.
People's Daily Online. The only global power generation equipment in the running state of the ocean temperature difference [EB/OL]. (2013-04-02)[2021-05-31]. http://finance.people.com.cn/n/2013/0402/c348883-20999640.html.

[25] 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展2016 [M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
National Marine Technology Center. Progress of marine energy technology in China 2016 [M]. Beijing: China Ocean Press, 2016.

[26] Chen F Y, Liu L, Peng J P, et al. Theoretical and experimental research on the thermal performance of ocean thermal energy conversion system using the rankine cycle mode [J]. Energy, 2019, 183: 497–503.

[27] 青岛蓝谷. 研发海洋温差能发电, 运用可再生能源 [EB/OL]. (2017-05-05)[2021-05-31]. http://qdlg.qingdao.gov.cn/n32561027/n32561043/180402094044570250.html#.
Qingdao Oceantec Valley. Research and development of ocean thermoelectric power generation, the use of renewable energy [EB/OL]. (2017-05-05)[2021-05-31]. http://qdlg.qingdao.gov.cn/n32561027/n32561043/180402094044570250.html#.

[28] 张雅洁, 赵强, 褚温家. 海洋能发电技术发展现状及发展路线图 [J]. 中国电力, 2018, 592(3): 98–103.
Zhang Y J, Zhao Q, Chu W J. Development status and development roadmap of ocean energy power generation technology [J]. Electric Power, 2018, 592(3): 98–103.

[29] 广东电力交易中心有限责任公司. 广东电力市场2020年年度报告 [R]. 广州: 广东电力交易中心有限责任公司, 2021.
Guangdong Power Exchange Center Co. Ltd. Guangdong electric power market report in 2020 [R]. Guangzhou: Guangdong Power Exchange Center Co. Ltd., 2021.

[30] 广东省自然资源厅, 广东省发展和改革委员会, 广东省工业和信息化厅. 广东省加快发展海洋六大产业行动方案（2019—2021年）[EB/OL]. (2019-12-31)[2021-05-31]. https://www.scau.edu.cn/_upload/article/files/9e/42/4a05ed0c445395ede5a124eaa2ca/8cca7555-6258-41ca-882d-6d51a98b1595.pdf.
Department of Natural Resources of Guangdong Province, Guangdong Province Development and Reform commission, Department of Industry and Information Technology of Guangdong Province. Action plan of Guangdong Province to accelerate the development of six marine industries (2019—2021) [EB/OL]. (2019-12-31)[2021-05-31]. https://www.scau.edu.cn/_upload/article/files/9e/42/4a05ed0c445395ede5a124eaa2ca/8cca7555-6258-41ca-882d-6d51a98b1595.pdf.

[31] 广东省人民政府. 广东省2020年度碳排放配额分配实施方案 [EB/OL]. (2020-12-04)[2021-05-31]. http://www.cnemission.com/article/zcfg/gdszcwj/202012/20201200002034.shtml.
Peoples's Government of Guangdong Province. Guangdong Province 2020 annual carbon emission quota allocation implementation plan [EB/OL]. (2020-12-04)[2021-05-31]. http://www.cnemission.com/article/zcfg/gdszcwj/202012/20201200002034.shtml.

[32] 新华网. 全球第一台华龙一号核电机组投入商业运行 [EB/OL]. (2021-01-30)[2021-05-31]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/30/content_5583759.htm.
Xinhua Net. The world's first Hualong-1 nuclear power unit was put into commercial operation [EB/OL]. (2021-01-30)[2021-05-31]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/30/content_5583759.htm.

[33] 前瞻经济学人. 2020年广东省LNG接收站行业市场现状及发展前景分析 [EB/OL]. (2020-12-04)[2021-05-31]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685114675067282243&wfr=spider&for=pc.
Forward-The Economist. Analysis of the market status and development of Guamgdong Province LNG receiving station industry in 2020 [EB/OL]. (2020-12-04)[2021-05-31]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685114675067282243&wfr=spider&for=pc.

[34] 潇湘晨报. 中海油珠海接收站接卸LNG总量突破1000万吨 [EB/OL]. (2020-06-15)[2021-05-31]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1669567770882658041&wfr=spider&for=pc.
Xiaoxiang Morning News. The total amount of LNG received and unloaded at CNOOC Zhuhai terminal exceeded 10 million tons [EB/OL]. (2020-06-15)[2021-05-31]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1669567770882658041&wfr=spider&for=pc.

[35] 广东珠海金湾液化天然气有限公司. 中国海油珠海LNG项目一期工程 [R]. 珠海: 广东珠海金湾液化天然气有限公司, 2019.
Guangdong Zhuhai Jinwan LNG Co., Ltd. CNOOC Zhuhai LNG project phase I [R]. Zhuhai: Guangdong Zhuhai Jinwan LNG Co., Ltd., 2019.