

# 海洋温差能与极地低温冷能资源综合利用研究

廖周鑫<sup>1</sup>, 王振宇<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中国极地研究中心(中国极地研究所), 上海

<sup>2</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年4月29日

## 摘要

极地低温冷能资源储量巨大, 主要分布于极地海域及南极大陆。这些资源为优化极地能源结构、实现碳达峰与碳中和目标提供了重要基础, 也是未来极地能源可持续供应系统的重要组成部分。目前, 海洋温差能(OTEC)发电技术与装备仍处于试验阶段。由于兆瓦级试验电站的建设成本极高, 且整体技术成熟度尚不足以支撑规模化商业利用, 相关领域仍面临诸多技术挑战。本文总结了国内外温差能开发模式、综合利用现状以及相关技术装备所面临的瓶颈; 结合极地海洋温差能资源的分布特性, 提出了探索冷能回收、温差能发电及低温冷海水综合利用示范基地建设的思路, 并给出了相应的开发模式建议。本研究旨在为极地海洋温差能与冷能资源的综合利用提供技术参考与应用指南。

## 关键词

极地温差能, 低温海水资源, 冷能, 综合利用, 温差能发电

# Research on the Comprehensive Utilization of Ocean Thermal Energy and Polar Low-Temperature Cold Energy Resources

Zhouxin Liao<sup>1</sup>, Zhenyu Wang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Polar Research Institute of China, Shanghai

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: March 20, 2026; accepted: April 20, 2026; published: April 29, 2026

## Abstract

Polar cold energy resources boast enormous reserves and are primarily distributed in polar marine areas and the Antarctic continent. These resources provide a fundamental basis for optimizing

\*通讯作者。

polar energy structures to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals, and constitute a critical component of future polar sustainable energy supply systems. At present, technologies and equipment for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) are still in the experimental stage. Due to the high construction costs of megawatt-level test stations and insufficient technological maturity for commercial-scale utilization, significant technical challenges remain. This paper summarizes global OTEC development models, comprehensive utilization, and the challenges facing relevant equipment. In view of the distribution characteristics of polar ocean thermal energy, this study proposes exploring demonstration bases for cold energy recovery, OTEC power generation, and the comprehensive utilization of low-temperature seawater. The research provides technical reference and application guidance for the integrated utilization of polar ocean thermal and cold energy resources.

## Keywords

Polar Ocean Thermal Energy, Low-Temperature Seawater Resources, Cold Energy, Comprehensive Utilization, Ocean Thermal Energy Conversion Power Generation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在全球能源低碳转型和极地活动持续拓展的背景下, 开发适应极端环境条件的清洁能源利用方式, 已成为极地基础设施建设和能源供应系统优化的重要方向。极地地区蕴藏丰富的海洋与环境能源资源, 其中, 低温冷能资源稳定、分布广泛, 具有较高的开发利用价值[1]。海洋温差能(OTEC)作为海洋可再生能源的重要形式, 利用海洋表层暖海水与深层冷海水之间的温差进行热功转换, 具有清洁、连续和可与海水淡化、海水空调等协同利用的特点[2]。研究表明, 当海洋表层与深层海水温差达到约 20℃ 以上时, OTEC 系统通常具备较好的工程应用基础[3]-[5]。Nihous 的评估结果指出, 全球 OTEC 理论资源潜力可达数万 TWh/a 量级[2]。然而, 由于系统热效率较低、冷海水输送困难、换热设备成本较高以及海上系统集成复杂等问题, OTEC 目前仍以试验验证和示范工程为主, 尚未实现大规模商业化应用[4]-[6]。

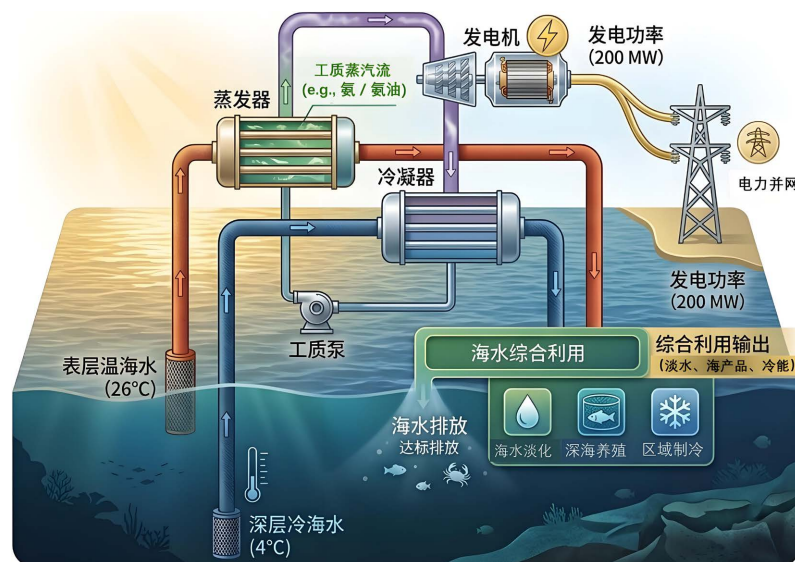
与热带海域典型的 OTEC 开发条件不同, 极地地区在传统海洋温差发电方面并不具有普遍优势, 但其低温冷能资源丰富, 尤其南极近岸及南大洋海域海水温度常年接近冰点, 典型范围约为-1.8℃至 2℃[7][8], 尤其气温在春秋冬季温度普遍在-20℃以下, 其水-气之间的温差利用为冷能直接利用和低温海水综合利用提供了良好条件。已有研究表明, 低温海水可广泛应用于建筑供冷、设备冷却、冷链保鲜、海产品加工、制冰及海水源热泵等领域[3][5][9]。若将冷能利用与温差能转换、海水淡化及终端用能系统相耦合, 可形成多场景协同的综合利用模式, 从而提升整体能效和系统经济性。基于此, 本文在梳理国内外 OTEC 及低温海水综合利用研究进展的基础上, 结合极地低温资源特征, 分析温差能与冷能综合利用的适用模式与关键问题, 以为极地能源供应提供保障和相关技术示范提供参考。

## 2. 温差能利用的研究进展

### 2.1. 概念提出与应用探索

温差能是利用冷热源之间温度差实现能量转换的技术形式, 海洋温差能(OTEC)是其中的重要类型,

主要依赖海洋表层暖水与深层冷水之间的温差进行发电, 并可与制冷、淡化及低温海水综合利用相结合 [10]。OTEC 系统性能主要受温差条件、换热效率及冷海水输送能力影响。由于系统热效率较低、取冷海水工程复杂、设备投资较高, 其具体原理如图 1 所示, 当前 OTEC 仍以试验研究和示范应用为主。



**Figure 1.** Principle of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) power generation system

**图 1.** 海洋温差能发电系统原理

从发展过程看, OTEC 概念提出较早, 美国、日本等国已开展多轮样机试验和示范研究, 并逐步探索与海水空调、冷链保鲜及深层海水利用相结合的综合开发模式 [11]-[17]。总体而言, 当前国际 OTEC 装机规模仍主要集中在百千瓦级至兆瓦级示范阶段, 尚未实现大规模商业化部署 [18]。

## 2.2. 温差能发电的关键技术

### 2.2.1. 高效热交换器技术

热交换器是海洋温差能发电(OTEC)系统中的核心设备, 其性能直接影响工质蒸发、冷凝效率以及系统净输出功率。由于 OTEC 利用的海水温差较小, 蒸发器和冷凝器必须在低温差条件下实现高效传热, 因此热交换器需同时具备高传热效率、低流动阻力、良好耐腐蚀性和长期运行稳定性 [19]。近年研究表明, 热交换器不仅决定系统传热性能, 也是影响 OTEC 设备成本和工程放大的关键因素之一。

当前 OTEC 高效热交换器技术主要集中在结构优化、材料选择和防污防腐等方面。在结构形式上, 板式换热器因换热面积大、结构紧凑而适用于中小型系统, 壳管式换热器则因耐压性和工程适应性较好, 更适合大型系统应用; 微通道和紧凑式换热器也因比表面积大而受到关注 [20] [21]。Liu 等 [22] 指出, 通过优化流道结构可在增强传热的同时控制压降, 提高低温差工况下的综合性能。在材料方面, 钛合金、不锈钢、铝合金及复合材料均有应用研究, 其中钛合金耐海水腐蚀性性能最好, 但成本较高 [23]。此外, 海水环境下的结垢、生物污损和腐蚀会降低低换热性能, Nakatsuka 等 [24] 认为采用表面改性、流道优化和在线清洗等措施, 可有效提高换热器长期运行稳定性。总体来看, 高效热交换器技术正由单一传热强化向传热、阻力、防腐和防污协同优化方向发展, 是提升 OTEC 系统效率和经济性的关键基础。

### 2.2.2. 工质选择

在 OTEC 系统中, 工质是关键的组成部分, 它负责吸收海水中的热量并驱动涡轮机转动, 从而实现

能量的转换。为了在温差发电过程中保持较高的热效率,工质必须适应小温差(大约 20℃)的工作环境。国际上已经建成的温差能示范电站,曾经使用过多种工质,包括 R22 (氟利昂)、R717 (氨)、R32 (二氟甲烷)等。在这些工质中,R717 被认为是相对理想的工质类型[25] [26]。尽管国内机构提出了 R125/R600A (1:1)混合工质、液化石油气(LNG)替代工质等方案,但目前建成或设计中的温差能样机大多数仍然采用 R717。新型高效工质的研究和开发难度较大,国内的研究主要集中在实验阶段,缺乏实际应用的平台和经验积累[1]。总体来看,OTEC 工质研究正由传统单一工质应用逐步转向多工质比较与系统协同优化,其目标是在效率、可靠性和环境可接受性之间取得平衡。

### 2.2.3. 循环技术

循环技术是决定海洋温差能与 LNG 冷能发电系统性能的关键因素,其核心在于提高热源与工质之间的温度匹配程度并降低系统不可逆损失,具体如表 1 所示。针对海洋温差能发电,Rajagopalan 和 Nihous [27]对开式、闭式及混合式循环进行了热力学比较,结果表明,闭式循环在系统稳定性、设备成熟度和工程集成性方面具有明显优势,因此已成为当前研究与示范应用的主流路线。进一步地, Ma 等[28]针对有机朗肯循环与 Kalina 循环开展了性能分析,指出混合工质循环能够改善蒸发与冷凝过程中的温度匹配关系,从而降低换热不可逆损失;但同时,系统控制复杂性和运行成本也相应增加。Soyturk 和 Kizilkan [29]则对跨临界循环和混合工质循环进行了优化研究,发现跨临界方案在低温差工况下具有更好的热源匹配特性和净功输出潜力,但其对换热器设计和工况控制提出了更高要求。

在 LNG 冷能发电方面,Dorosoz 等[30]对直接膨胀循环、朗肯循环和布雷顿循环进行了系统比较,结果表明直接膨胀循环流程最简单,但冷量利用深度有限;朗肯循环技术较成熟,具有较好的工程适应性;而布雷顿循环及组合循环在发电效率和冷能梯级利用方面更具优势。此外,Wang 等[31]对 LNG 冷能组合循环进行了热力学与经济性分析,指出多级耦合循环能够有效提高系统综合能效,但设备投资和系统集成复杂度也显著增加。Sermsuk 等[32]进一步提出 LNG 冷能与储能、制冷或联合供能系统耦合的方案,认为多联产集成是提升冷能综合利用效率和经济性的关键方向。总体来看,低温能源发电循环技术正由单一发电效率优化转向兼顾净功输出、多联产耦合和工程可实施性的综合优化。

**Table 1.** Comparison of main cycle technologies for low-temperature energy power generation

**表 1.** 低温能源发电主要循环技术比较

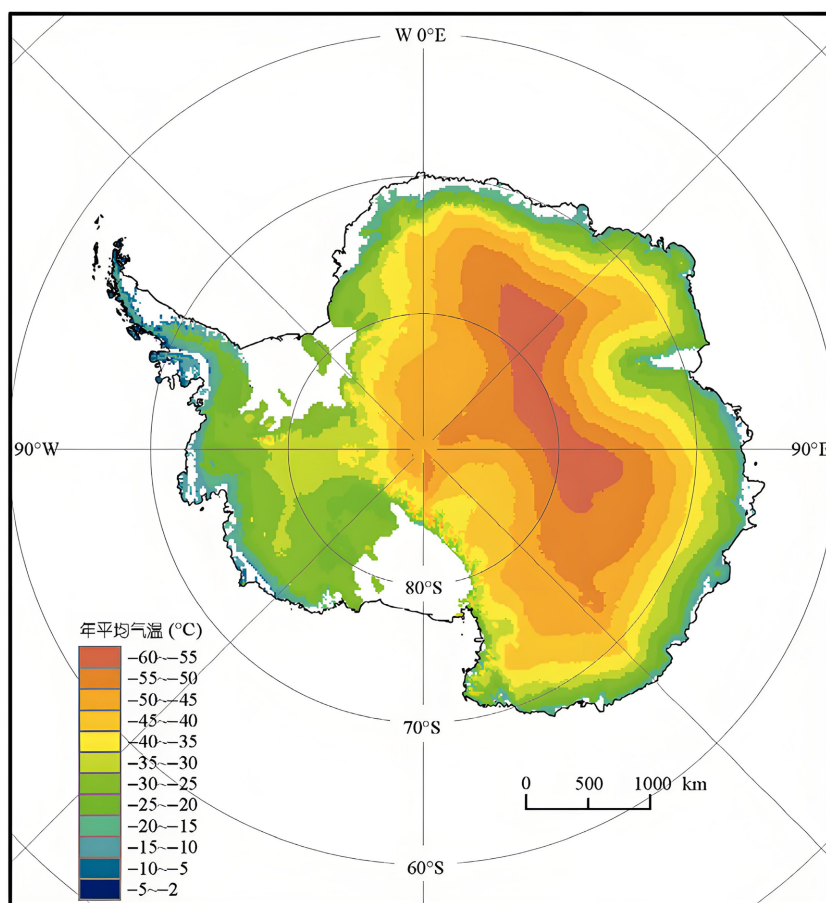
领域	技术类型	主要特点	优势	局限性
海洋温差能	闭式循环	低沸点工质封闭循环	稳定性好,工程化程度高	净输出受换热性能影响较大
海洋温差能	Kalina/跨临界/混合工质循环	改善温度匹配	有利于降低不可逆损失	系统复杂,控制要求高
LNG 冷能	直接膨胀循环	LNG 气化后直接膨胀做功	流程简单	冷能利用不充分
LNG 冷能	朗肯循环	二次工质回收冷量发电	技术成熟,适用性强	存在温区匹配不足
LNG 冷能	布雷顿/组合循环	多级或耦合利用冷量	效率高,梯级利用潜力大	系统复杂,投资较高

## 3. 极地温差能资源分布与研究情况

### 3.1. 南极区域温差能资源分布与研究情况

南极温差能资源主要分布于南大洋及其边缘海域,南大洋面积约  $2 \times 10^7$  km<sup>2</sup>,南大洋面积约  $2 \times 10^7$  km<sup>2</sup>,与印度洋、大西洋和太平洋相连,是全球海洋热量吸收的关键区域,图 2 为南极冰盖 10 m 深度处粒雪年平均气温空间分布情况[33],其显示内陆核心区气温低于-40℃、局部达-60℃,近岸沿海区介于

-10°C~-20°C。南大洋在过去数十年中经历了快速变化, 其吸收了全球上层 2000 m 海洋热量增益的 35%~43% (1970~2017 年), 近年来这一比例更上升至 45%~62% (2005~2017 年), 南极绕极流内及以北的水团在上层 1 km 以 0.1~0.2°C/10a 的速率增暖[34]。然而, Johnson 和 Purkey (2024) [35]利用 Deep Argo 和历史 CTD 数据的全球制图结果表明, 深层增暖趋势广泛存在, 尤其围绕南极底层水(AABW)形成区域最为显著, 增暖强度沿深层西边界流向北传播并随远离南极而减弱。尽管南大洋增暖显著, 但传统 OTEC 系统要求表深层温差至少约 18°C才能高效发电, 而满足该条件的区域主要集中在热带深水暖海区域[36]。南极海域表层水温常年在-1.8°C~2°C之间, 深层水温约 0°C~1°C, 表深层温差通常远低于 18°C, 限制了传统 OTEC 技术在该区域的应用, 南极冷能资源分布与该气温特征高度契合, 内陆核心区冷能密度高、稳定性强, 受地理条件限制仅适合科考站小规模直接利用; 近岸沿海区与南大洋低温海水形成冷能互补, 且科考站集中、海域条件便利, 是冷能综合开发的核心潜力区; 冰盖边缘过渡区可依托跨季节储冷技术, 成为冷能储输与梯级利用的衔接区域。



**Figure 2.** Spatial distribution of annual mean firm temperature at 10 m depth in the Antarctic Ice Sheet [33]

**图 2.** 南极冰盖 10 m 深度处粒雪年平均气温空间分布情况[33]

最新研究表明, 全球尺度上 OTEC 可短暂产生超过 35 TW 的功率, 在多千年时间尺度上可持续的最大发电速率为 5~10 TW [36]。综合评估认为 OTEC 全球理论潜力约为 8~10 TW [37]。在温室气体增暖情景下, 全球 OTEC 功率潜力预计到本世纪末将较当前水平增长约 46% [38]。不过, 上述潜力的主体仍位于热带和亚热带海域, 南极区域因温差不足并非 OTEC 的理想选址。值得注意的是, 美国国家可再生能源

源实验室(NREL)于2023年研究了一种将相变材料(PCM)与热电发电机(TEG)结合、利用海洋温差梯度为无人水下潜航器和水产养殖供能的新概念[39]。此外,热电发电机、形状记忆合金和小型热力循环系统等新兴技术也展现出为水下设备供能的潜力,但仍处于实验室测试或概念设计阶[40]。此类小型温差能利用技术为极地低温差环境下的能量获取开辟了新路径。

### 3.2. 北极区域温差能资源分布与研究情况

北极地区温差能资源主要集中在北冰洋及其边缘海。NOAA《北极报告卡2025》指出,2024年10月至2025年9月北极表面气温为1900年以来最高记录,过去10年为北极最暖的10年,且自2006年以来北极年均增温速率超过全球速率的两倍[41]。2024年8月,北冰洋南部巴伦支海平均海表温度高达约 $12^{\circ}\text{C}$ ,巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海等区域较1991~2020年基准变暖 $1.4^{\circ}\text{C}$ ,而东西伯利亚海、楚科奇海等太平洋扇区则偏冷 $0.54^{\circ}\text{C}$ [42]。1981~2020年间,北巴伦支海区域年增暖速率高达 $2.7^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,秋季可达 $4.0^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ [43]。然而,海洋温差最大值出现在热带、亚热带和赤道水域,热带地区通常是最佳OTEC选址[44]。北冰洋表层夏季水温一般在 $0^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ ,深层水温在 $-0.5^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 之间,表深层温差远低于 $18^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的OTEC运行阈值。

在冬季北极沿岸地区,海水与大气之间的温差可高达 $40^{\circ}\text{C}$ ,闭式循环系统可利用这种气-水温差进行能量转换[44]。研究表明,在海水温度为 $2^{\circ}\text{C}$ 、气温为 $-22^{\circ}\text{C}$ 的条件下,以4%的实际效率计算,1 $\text{m}^3$ 海水经气-水温差转换所产生的能量相当于该体积海水从1200m高处落下获得的水电能量[11]。这一“极地电站”(Barjot Polar Power Plant)概念为极地温差能利用提供了有别于传统OTEC的思路。此外,NOAA报告强调“大西洋化”(Atlantification)正在削弱北冰洋水层分层、增强热量传输并融化海冰[41],这意味着北极海洋热力结构正在持续改变。大规模OTEC部署的环境效应模拟研究显示,OTEC运行可使海表温度相对降低多达 $3.1^{\circ}\text{C}$ ,中层深度热量吸收增加,并增强生物生产力[45],这为评估极地温差能开发的环境影响提供了参考。未来,随着极地持续增暖和PCM-TEG等新型温差能技术的发展,极地低品位温差资源的综合利用有望成为重要研究方向。

## 4. 极地冷能回收与资源综合利用的技术构想

极地地区长期处于低温、强风和显著海-气温差环境之中,这些条件虽然增加了科考与工程运行难度,但也提供了可利用的低品位冷能资源。随着温差发电、相变能量采集、LNG冷能梯级利用和海洋能开发技术的发展,极地冷能资源化已具有一定技术基础[46]。结合现有研究进展,极地冷能利用可从低温差供电、跨季节储冷释能和深层海气协同利用三个方向展开,各方向技术瓶颈、现有解决方案与研发重点如下。

### 4.1. 面向无人值守监测系统的低温差供电

极地自动气象站、冰厚监测仪、漂流浮标和无人水下航行器负载较低,但运行周期长、补给困难,传统电池在低温环境下易出现容量衰减和续航不足问题[46]。温差发电基于塞贝克效应,具有无运动部件、结构简单和寿命较长等特点,适用于极地小功率持续供能[47]。Seatrec与伍兹霍尔海洋研究所开展了北极电站项目,针对北极冬季约 $20^{\circ}\text{C}$ 海-气温差进行热机设计,2025年原型在冰冻海洋试验场完成了一个月测试[48][49]。Seatrec开发的固-液和液-气相变能量采集技术已应用于infiniTE™浮标,该装置在7个月布放周期内累计获取能量超过10MJ[50][51]。从第二部分综述的技术基础看,该类装置若采用小型闭式循环方案,工质宜优先考虑R717(氨)。这是因为R717在低温工况下具有较好的热物性参数和较成熟的工程应用基础,且现有温差能示范系统中应用较多,更适合极地低温差、小功率装置的原理验证与样机开发。在换热器形式上,宜优先采用板式换热器或其他紧凑式换热器,其换热面积密度高、结

构紧凑、便于小型化集成,更适用于浮标、自动观测站等空间受限场景。同时,考虑极地海洋环境腐蚀和污损问题,换热部件材料可优先选用耐低温、耐腐蚀性能较好的钛合金或耐蚀不锈钢。总体而言,该方向的核心技术瓶颈仍在于极地超低温下热电转换效率偏低且温差稳定性不足,后续研发重点为优化低温热电材料性能,并开发小型化、抗寒型的温差-储能一体化装置。

#### 4.2. 基于冷能回收的“冬能夏用”储冷释能

LNG 冷能利用已形成较成熟的梯级利用模式,应用范围包括冷能发电、空气分离、低温冷冻和海水淡化[52][53]。相关研究指出,每吨 LNG 气化过程可释放约 240 kW·h 冷能[53]。上海 LNG 冷能发电装置性能试验中最大发电功率超过 3000 kW,设计年发电量约 2400 万 kW·h,说明低温冷能向电能转化具有工程可行性[54]。这一思路可延伸至极地场景,即在冬季利用 $-30^{\circ}\text{C}\sim-60^{\circ}\text{C}$ 环境低温液化空气或制备液氨,并将其作为冷能载体储存,待夏季气温回升后通过膨胀机或有机朗肯循环发电[53]。相关技术可延伸至极地场景,形成冬季液化空气或液氮储冷、夏季通过膨胀机发电的跨季节利用模式。结合第二部分对低温能源发电循环技术的比较,该方向在发电侧宜优先考虑朗肯循环或闭式循环方案。原因在于朗肯循环技术成熟、适用性较强,更适合极地区相对稳定但规模有限的用能场景;若进一步强调系统稳定性与运行可控性,则可采用闭式循环路线,以降低开放环境下低温工质损失和系统波动风险。在换热器选择上,对于固定站区装置可优先采用壳管式换热器与板式换热器组合形式,因为前者耐压性和工程适应性较好,适合储冷与释冷主流程;后者结构紧凑、传热效率较高,适合小型末端冷量利用单元。若涉及工质选择,则可优先考虑工程应用基础较好的 R717 或适用于低温回收过程的混合工质方案,但后者虽然有利于改善温度匹配、降低不可逆损失,其控制复杂性和运行成本也更高。因此,从近期示范角度看,宜优先采用成熟工质和成熟循环,以提高系统可实施性。该方向目前主要受制于储冷绝热难度大、低温载体蒸发损失高及整体经济性不足,后续研发需聚焦极地专用绝热材料研发和冷能梯级利用模式优化。

#### 4.3. 深层海气协同利用平台

极地海域深层海水与表层冷空气之间的热力梯度,为多能耦合利用提供了条件。Karam 等对弗拉姆海峡的研究表明,自 20 世纪 80 年代以来,欧亚盆地深层水升温约  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,格陵兰海深层水升温约  $0.4^{\circ}\text{C}\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,后者在 2017~2018 年前后已由北冰洋深层热汇转为相对热源[55]。这一变化意味着深层海水与表层冷空气之间的温差利用潜力值得重视。技术上,我国已于 2023 年完成 20 kW 级海洋漂浮式温差能装置海试,并实现 50 kW 级系统发电[56]。南极罗斯岛风电场由 3 台 330 kW 机组组成,总装机 0.99 MW,后续新西兰又启动 3 台 1 MW 机组替换计划并配置储能系统[57]-[59]。基于上述基础,可在弗拉姆海峡或罗斯海近海构建冰区加强型浮式平台,将小型温差发电、极地风电和深层海水利用集成为综合能源系统,并通过针对性设计的能量管理策略,依托电路及程序设定优化,实现对极地低温差环境下微小能量的有效捕捉与高效利用,提升低品位温差能的资源化利用效率。从第二部分关于循环技术与换热设备的分析来看,该平台型系统若配置小型温差发电子系统,宜优先采用闭式循环,因为闭式循环在系统稳定性、设备成熟度和工程集成性方面优势较为明显,更适用于海上复杂环境下的长期运行。若后续追求更高的热源匹配性能,可探索混合工质循环或跨临界方案,但其系统复杂度较高,现阶段更适合作为优化研究方向。在换热器方面,考虑平台布置空间、海上集成度及维护便利性,宜优先选用紧凑式板式换热器;而在深层海水输送和大流量换热环节,可根据耐压和抗冲击要求配置壳管式换热设备。材料方面,应优先选择钛合金、低温不锈钢等兼顾耐腐蚀与低温韧性的结构材料,并结合防污表面处理和在线清洗措施提升长期运行稳定性。该方向的技术难点集中在极地低温环境下材料易发生脆裂、冰载荷对浮式平台结构冲击显著,以及多能集成系统的极地环境适应性不足,后续研发重点为开发冰区加强型浮式

平台一体化设计技术, 攻关多能耦合系统的低温联控与故障自适应技术。

#### 4.4. 初步可行性分析

综合来看, 第四部分提出的三类技术构想均建立在极地低温环境、海-气温差及低温海水资源等客观条件基础上, 具有一定研究和应用可行性, 但在技术成熟度、工程难度和适用场景方面存在明显差异。

其中, 面向无人值守监测系统的低温差供电与极地自动气象站、漂流浮标和无人潜航器等低功耗装备的能源需求较为匹配。该类系统对供电功率要求不高, 但对长期稳定运行和低维护性要求较高, 而温差发电和相变储能装置具有结构简单、连续供能潜力较强等特点, 因此近期示范应用前景较好。不过, 其输出功率仍受限于低温差条件和材料性能, 后续仍需提高低温环境下的能量转换效率和系统可靠性。基于冷能回收的“冬能夏用”储冷释能构想与极地冬季低温资源丰富、夏季能源保障需求上升的特点较为契合, 在科考站供能、制冷和冷链保障等方面具有潜在应用价值。该方向具备一定的技术借鉴基础, 但在极地环境下仍面临储冷损失、绝热难度大和系统经济性不足等问题, 因此现阶段更适合开展小规模验证和多场景适配研究。相比之下, 深层海气协同利用平台能够进一步拓展极地低品位能源的综合利用方式, 在多能耦合供能和近海综合保障方面具有一定前瞻性。但该方向涉及浮式平台抗冰结构、低温材料适应性、多系统协同控制等复杂问题, 工程实施难度较大, 短期内尚不具备大规模应用条件, 更适合作为中长期重点攻关方向。

总体而言, 三类技术构想均具有一定发展潜力, 可按照“小功率供能优先示范、储冷释能逐步验证、海上多能平台长期攻关”的思路分阶段推进。

### 5. 结论

本研究梳理了极地温差能与冷能资源的分布特征及利用技术现状, 分析了不同技术构想的可行性与发展瓶颈, 为极地冷能资源化利用提供了技术参考与方向指引, 得到结论如下:

(1) 极地低温冷能资源储量丰富且空间分布差异显著, 近岸沿海区域与南大洋低温海水形成互补, 是冷能与温差能综合开发的核心潜力区域, 内陆冰盖核心区仅适合开展小规模冷能直接利用。

(2) 面向无人值守监测系统的低温差供电、跨季节储冷释能及深层海气协同利用三类技术构想具备工程基础, 同时面临热电转换效率低、储冷绝热难度大、材料与结构抗极端环境能力不足等瓶颈, 需通过专用材料研发、设备适配优化与系统集成攻关逐步解决。

(3) 后续研究可聚焦极地低温换热器材料开发、小型温差发电装置环境适配、多能耦合系统集成优化等方向, 通过极地现场试验与国际合作积累数据, 为相关示范工程建设与商业化发展提供支撑。

### 致 谢

本研究在数据获取与分析过程中, 得到了国家极地科学数据中心提供的数据支持与大力帮助, 在此致以诚挚的谢意。

### 基金项目

国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项: “极区复杂相态云探测技术及验证”项目; 子课题“地基微波辐射计极区观测试验”(2024YFB3907902-03)。

### 参考文献

- [1] 付强, 王国荣, 周守为, 等. 温差能与低温海水资源综合利用研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 52-60.
- [2] Nihous, G.C. (2007) An Estimate of Atlantic Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Resources. *Ocean Engineering*,

- 34**, 2210-2221. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.06.004>
- [3] Liu, W., Xu, X., Chen, F., Liu, Y., Li, S., Liu, L., *et al.* (2020) A Review of Research on the Closed Thermodynamic Cycles of Ocean Thermal Energy Conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **119**, Article ID: 109581. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109581>
- [4] Langer, J., Quist, J. and Blok, K. (2020) Recent Progress in the Economics of Ocean Thermal Energy Conversion: Critical Review and Research Agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **130**, Article ID: 109960. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109960>
- [5] Nakib, T.H., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., Habib, M.A., Adzman, N.N. and Amin, N. (2025) Global Challenges of Ocean Thermal Energy Conversion and Its Prospects: A Review. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, **11**, 197-231. <https://doi.org/10.1007/s40722-024-00368-4>
- [6] Vicente, M., Imperadore, A., Correia da Fonseca, F.X., Vieira, M. and Cândido, J. (2023) Enhancing Islanded Power Systems: Microgrid Modeling and Evaluating System Benefits of Ocean Renewable Energy Integration. *Energies*, **16**, Article No. 7517. <https://doi.org/10.3390/en16227517>
- [7] Silvano, A., Purkey, S., Gordon, A.L., Castagno, P., Stewart, A.L., Rintoul, S.R., *et al.* (2023) Observing Antarctic Bottom Water in the Southern Ocean. *Frontiers in Marine Science*, **10**, Article ID: 1221701. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1221701>
- [8] Walton, D.W.H. (2011) The Scientific Committee on Antarctic Research and the Antarctic Treaty. In: *Science Diplomacy: Science, Antarctica, and the Governance of International Spaces*, Smithsonian Institution Scholarly Press, 75-88. <https://doi.org/10.5479/si.9781935623069.75>
- [9] Ren, J., Xu, G., Zhao, H. and Kang, Q. (2025) Wave Energy Powered Reverse Osmosis Seawater Desalination: Research Development and Future Perspective. *Process Safety and Environmental Protection*, **203**, Article ID: 107978. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107978>
- [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.
- [11] Owens, W.L. and Trimble, L.C. (1981) Mini-OTEC Operational Results. *Journal of Solar Energy Engineering*, **103**, 233-240. <https://doi.org/10.1115/1.3266245>
- [12] Lennard, D.E. (1987) Ocean Thermal Energy Conversion: Past Progress and Future Prospects. *IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, **134**, 381-391. <https://doi.org/10.1049/ip-a-1.1987.0059>
- [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.
- [14] Hartman, D.J. (2015) Makai Connects World's Largest Ocean Thermal Plant to U.S. Grid. <https://oceannews.com/news/energy/makai-connects-world-s-largest-ocean-thermal-plant-to-u-s-grid/>
- [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): 155-120.
- [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] 陈风云, 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.
- [19] 杨晓玮. 海洋温差能发电系统多目标优化与整机运行特性研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [20] Dong, G., Huang, C., Wu, D., Liu, S., Wu, N., Huang, P., *et al.* (2025) A Review of the Impacts of the Microchannel Structure on the Heat Transfer Performance of Microchannel Heat Exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **169**, Article ID: 109806. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109806>
- [21] Kapustenko, P.O., Arsenyeva, O.P., Varbanov, P.S. and Tovazhnyanskyy, L.L. (2025) Heat Transfer Intensification in Compact Heat Exchangers with Channels of Various Geometries and Size. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **167**, Article ID: 109273. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109273>
- [22] Liu, Y., You, X., Tian, M., Zhang, T., Chen, Y. and Yu, Y. (2025) Identification of Ocean Thermal Energy Conversion Heat Exchange Model Based on Long Short-Term Memory Network and Heat Exchange Efficiency Improvement Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, **13**, 2191. <https://doi.org/10.3390/jmse13112191>
- [23] Wang, P., Liu, Q., Xu, D., Peng, W., Liu, F., Hou, J., *et al.* (2026) Investigation of Fouling Development and Kinetics in Titanium Alloy Seawater Heat Exchanger Tubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **117**, Article ID: 110107. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2025.110107>
- [24] Nakatsuka, M.A., Mansfeld, A.C., Thapa, S.S., Veedu, V.P. and Brown, E.P. (2021) Novel Anti-Fouling Surface Treatment for Heat Exchangers. In: *CORROSION 2021*, Association for Materials Protection and Performance, 1-8. <https://doi.org/10.5006/c2021-16734>
- [25] Hu, Z., Chen, Y. and Zhang, C. (2024) Role of R717 Blends in Ocean Thermal Energy Conversion Organic Rankine

- Cycle. *Renewable Energy*, **221**, Article ID: 119756. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119756>
- [26] Yang, M. and Yeh, R. (2022) Investigation of the Potential of R717 Blends as Working Fluids in the Organic Rankine Cycle (ORC) for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). *Energy*, **245**, Article ID: 123317. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123317>
- [27] Rajagopalan, K. and Nihous, G.C. (2018) A Review on the Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **91**, 925-939.
- [28] Ma, Q., Gao, Z., Huang, J., Mahian, O., Feng, X., Lu, H., *et al.* (2023) Thermodynamic Analysis and Turbine Design of a 100 kW OTEC-ORC with Binary Non-Azeotropic Working Fluid. *Energy*, **263**, Article ID: 126097. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126097>
- [29] Soyuturk, G. and Kizilkan, O. (2024) An Innovative OTEC and PV/T-Based Multi-Generation System with LNG Cold Energy Recovery for Sustainable Production of Hydrogen and Distilled Water. *International Journal of Hydrogen Energy*, **75**, 613-624. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.022>
- [30] Dorosz, P., Wojcieszak, P. and Malecha, Z. (2018) Exergetic Analysis, Optimization and Comparison of LNG Cold Exergy Recovery Systems for Transportation. *Entropy*, **20**, Article No. 59. <https://doi.org/10.3390/e20010059>
- [31] Wang, F., Li, P., Gai, L., Chen, Y., Zhu, B., Chen, X., *et al.* (2024) Enhancing the Efficiency of Power Generation through the Utilisation of LNG Cold Energy by a Dual-Fluid Condensation Rankine Cycle System. *Energy*, **305**, Article ID: 132113. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132113>
- [32] Sermsuk, M., Sukjai, Y., Wiboonrat, M. and Kiatkittipong, K. (2022) Feasibility Study of a Combined System of Electricity Generation and Cooling from Liquefied Natural Gas to Reduce the Electricity Cost of Data Centres. *Energy*, **254**, Article ID: 124397. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124397>
- [33] 王叶堂, 侯书贵. 南极冰盖 10 m 深度处粒雪温度空间分布[J]. 中国科学: 地球科学, 2010(11): 1489-1503.
- [34] Auger, M., Morrow, R., Kestenare, E., Sallée, J. and Cowley, R. (2021) Southern Ocean *In-Situ* Temperature Trends over 25 Years Emerge from Interannual Variability. *Nature Communications*, **12**, Article No. 514. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20781-1>
- [35] Johnson, G.C. and Purkey, S.G. (2024) Refined Estimates of Global Ocean Deep and Abyssal Decadal Warming Trends. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2024GL111229. <https://doi.org/10.1029/2024gl111229>
- [36] Nickoloff, A.G., Olim, S.T., Eby, M. and Weaver, A.J. (2025) An Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources and Climate Change Mitigation Potential. *Climatic Change*, **178**, Article No. 103. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03933-4>
- [37] Jing, F., Wang, X., Mei, Y. and Tian, R. (2025) A Comprehensive Review on Ocean Thermal Energy Conversion Technology: Thermodynamic Optimization, Multi-Energy Integration, and Byproduct Utilization. *Energy Conversion and Management: X*, **27**, Article ID: 101188. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101188>
- [38] Du, T., Jing, Z., Wu, L., Wang, H., Chen, Z., Ma, X., *et al.* (2022) Growth of Ocean Thermal Energy Conversion Resources under Greenhouse Warming Regulated by Oceanic Eddies. *Nature Communications*, **13**, Article No. 7249. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34835-z>
- [39] Lin, M. and Yang, C. (2020) Ocean Observation Technologies: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **33**, Article No. 32. <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00449-z>
- [40] Jung, H., Subban, C.V., McTigue, J.D., Martinez, J.J., Copping, A.E., Osorio, J., *et al.* (2022) Extracting Energy from Ocean Thermal and Salinity Gradients to Power Unmanned Underwater Vehicles: State of the Art, Current Limitations, and Future Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **160**, Article ID: 112283. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112283>
- [41] Druckenmiller, M.L., Thoman, R.L. and Moon, T.A. (2025) NOAA Arctic Report Card 2025: Executive Summary. <https://doi.org/10.25923/mrzf-j897>
- [42] Timmermans, M.L. and Labe, Z. (2022) Sea Surface Temperature. <https://doi.org/10.25923/p493-2548>
- [43] Isaksen, K., Nordli, Ø., Ivanov, B., Kølitzow, M.A.Ø., Aaboe, S., Gjeltén, H.M., *et al.* (2022) Exceptional Warming over the Barents Area. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
- [44] Nair, L.S. (2025) Harnessing Power from Ocean: India's Potential and Challenges. In: Chattopadhyay, S., Ed., *Marine and Coastal Resources of India: Selected Case Studies*, Springer, 293-322. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-81276-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-81276-7_18)
- [45] Nickoloff, A.G., Olim, S.T., Eby, M. and Weaver, A.J. (2025) Environmental Impacts from the Widespread Implementation of Ocean Thermal Energy Conversion. *Climatic Change*, **178**, Article No. 102. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03944-1>
- [46] 王长宏, 林涛, 曾志环. 半导体温差发电过程的模型分析与数值仿真[J]. 物理学报, 2014, 63(19): 311-316.
- [47] Seatrec Inc. (2020) Development of Ocean Thermal Energy Harvesting Systems. U.S. Small Business Innovation Re-

- 
- search (SBIR). <https://www.sbir.gov/portfolio/681121>
- [48] Seatrec Inc. and Woods Hole Oceanographic Institution (2021) Air-Sea Thermal Energy Harvesting on an Arctic Buoy: Phase I STTR. Office of Naval Research, U.S. SBIR/STTR. <https://seatrec.com/technology/>
- [49] Seatrec Inc. (2025) Seatrec Unlocks Unlimited Power in the Strategic Arctic with Successful Field Tests at Great Lakes Research Center's Frozen Marine Testbed. <https://seatrec.com/seatrec-unlocks-unlimited-power-in-the-strategic-arctic-with-successful-field-tests-at-great-lakes-research-centers-frozen-marine-testbed/>
- [50] Seatrec Inc. (2023) Technology: Phase Change Energy Harvesting. <https://seatrec.com/technology/>
- [51] Seatrec Inc. (2025) Seatrec's infiniTE™ Float Surpasses 1,000 Dives for Naval Postgraduate School. <https://seatrec.com/seatrecs-infinite-float-surpasses-1000-dives-for-naval-postgraduate-school/>
- [52] 前瞻产业研究院. 预见 2024: 《2024 年中国 LNG 冷能行业全景图谱》[R]. 深圳: 前瞻产业研究院, 2024.
- [53] 陈金瑞, 刘刚, 梁豪, 等. 温差能与低温海水资源综合利用研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 63-71.
- [54] 中海石油气电集团. 国内首套、世界最大 LNG 冷能发电装置并网试验成功[EB/OL]. <https://mgas.in-en.com/html/gas-3673615.shtml>, 2026-04-22.
- [55] Karam, S., Heuzé, C., Hoppmann, M. and de Steur, L. (2024) Continued Warming of Deep Waters in the Fram Strait. *Ocean Science*, **20**, 917-930. <https://doi.org/10.5194/os-20-917-2024>
- [56] 广东省水力和新能源发电工程学会. 全球海洋能发展动向及启示(2025) [EB/OL]. 北极星电力新闻网. <https://www.gdshe.org/article/24687.html>, 2025-05-19.
- [57] Power Technology. The Ross Island Wind Farm Project, Antarctica. <https://www.power-technology.com/projects/rossislandwindfarm/>
- [58] Antarctica New Zealand (2023) New Turbines for the Windiest Continent. <https://www.antarcticanz.govt.nz/media/news/new-turbines-for-the-windiest-continent>
- [59] EWT Direct Wind (2023) EWT to Supply and Install 3 DW54X-1MW Turbines at Ross Island, Antarctica. <https://ewtdirectwind.com/news/ewt-to-supply-and-install-3-dw54x-1mw-turbines-at-ross-island-antarctica/>