

极地工程建造进展与发展构想

徐刚, 郭彤*

(东南大学土木工程学院, 南京 211189)

摘要: 极地具有超低温、强风雪、极昼极夜、厚冰盖及冻土等极端环境特征, 极地工程是涉及科学研究、国家战略、能源转型、国际合作的关键载体, 开展极地工程建造成为人类突破自然极限的重要实践; 梳理极地工程建造的发展现状与趋势, 构建面向未来的极地工程认知框架, 兼有理论、技术、战略研究价值。本文在总结国内外极地工程建造现状与经验的基础上, 凝练了工程适应性、能源供应、建造效率、自持能力、生态环境、标准与制度支撑等方面的突出问题, 归纳出任务牵引与功能拓展、地域纵深与复杂环境拓展、智能化与可持续发展、国际协作与规则共建、地外探索与文明延伸等发展趋势。提出了以需求牵引、科技驱动、绿色约束、合作共建为核心支点, 辅以标准法规、人才组织、数字化与数据治理等横向支撑的极地工程建造发展构想, 在“立足南极、拓展北极、参与国际”的战略定位下细化出服务前沿科学研究、支持自主可控技术突破、推进“双碳”目标国际示范、推动国际规则共建及治理的发展目标。建议在宏观战略与政策部署、技术体系与研发路线、工程示范与基地建设、国际协作与治理规范等方面开展积极行动, 提升极地工程建造的综合能力, 推动极地工程由工程验证迈向体系化发展, 成为人类文明向更广阔空间延伸的重要技术基石。

关键词: 极地工程; 极端环境; 智能建造; 考察站; 低温材料; 韧性结构

中图分类号: TU399 **文献标识码:** A

Polar Engineering Construction: Development Status and Perspectives

Xu Gang, Guo Tong*

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Polar regions are characterized by extreme environmental conditions such as ultra-low temperatures, severe snowstorms, polar days and nights, thick ice sheets, and permafrost. Polar engineering serves as a critical vehicle for scientific research, national strategy, energy transition, and international cooperation. The advancement of polar engineering construction represents a significant endeavor to push the limits of nature. Reviewing the current state and trends of polar engineering construction and establishing a forward-looking cognitive framework hold theoretical, technological, and strategic values. Based on the summary of domestic and international developments and experiences in polar engineering construction, this study identifies key challenges in areas such as engineering adaptability, energy supply, construction efficiency, self-sufficiency, ecological environment, and the supporting systems of standards and regulations. It further outlines development trends including mission-driven expansion and functional diversification, geographical and environmental extension, intelligent and sustainable development, international collaboration and rule-making, as well as extraterrestrial exploration and the extension of human civilization. Building on this, the study proposes a development framework for polar engineering construction. The framework is centered on demand-driven approaches, technology-enabled

收稿日期: 2025-12-26; 修回日期: 2026-02-06

通讯作者: *郭彤, 东南大学土木工程学院教授, 研究方向为土木工程基础设施状态评估与性能提升; E-mail: guotong@seu.edu.cn

资助项目: 教育部基础学科和交叉学科突破计划(JYB2025XDXM804)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

advancement, green constraints, and collaborative construction, and is supported by pillars such as standards and regulations, talent and organizational structures, digitalization, and data governance. Under the strategic orientation of “grounded in Antarctica, expanding in the Arctic, and engaging internationally,” the study elaborates on development goals including supporting cutting-edge scientific research, enabling the attainment of independent and controllable technologies, advancing international demonstrations for carbon control, and promoting the joint establishment and governance of international rules. Additionally, the study recommends proactive actions in macro-level strategy and policy formulation, technology systems and research and development roadmaps, engineering demonstration and infrastructure development, as well as international collaboration and governance standards. These efforts aim to enhance the comprehensive capacity of polar engineering construction and facilitate its evolution from engineering validation to systematic development, thereby establishing it as a key technological cornerstone for the extension of human civilization into broader frontiers.

Keywords: polar engineering; extreme environments; intelligent construction; research stations; low-temperature materials; resilient structures

一、前言

极地通常指南极和北极（66°34'纬度线以上），被长期视为人类生存和工程建造的“禁区”，具有超低温、强风雪、极昼极夜、厚冰盖和冻土等极端环境特征。南极大陆面积约为 $1.425 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，冰层的平均厚度 $>2200 \text{ m}$ 、最大厚度 $>4000 \text{ m}$ ，这些冰川约占全球陆地冰量的90%、全球淡水总量的70%，是全球最大的淡水储库^[1,2]。厚冰层覆盖下的南极大陆地质活动受限，但冰盖运动与表面融化对全球海平面变化具有重要影响，是全球气候变化研究的关键指标区^[3]。北极以海洋为主体，浮冰、冻土、岛屿交错分布，环境变化剧烈、空间差异显著，是气候变化的“放大器”；海冰消融、冻土退化、海岸侵蚀过程对全球气候系统也有放大效应。北极成为地球系统科学的“天然实验室”，也是国际航运、资源开发、地缘竞争的重要空间^[4,5]。受极端因素的影响，南北极地区的生存、建造、运输、能源保障等面临极大挑战。随着全球气候变暖、能源结构转型、科技进步、地缘竞争格局变化，在极地开展工程建造的战略价值由单一支撑科学考察逐步拓展至航道与应急保障、清洁能源试验、国际规则参与等更广泛领域^[6,7]。

人类对极地的认知经历了从地理大发现时代的“启航”，到20世纪初南极点竞逐的“登顶”，再到二战后国际地球物理年和《南极条约》确立的“和平与科学”框架下制度化考察^[8-10]。在早期的探险活动中，人类主要通过临时营地和帐篷、雪橇运输、船舶航行等方式应对极端环境，工程与技术手段相对粗放。20世纪中期以来，极地科学考察与工程建设开始制度化，各国建立常年或夏季考察站，形成南极站网、北极科研与资源平台体系，逐步推

动极地工程从“生存尝试”向系统支撑转型。进入21世纪，南极站网逐步加密，北极科研观测与资源调查并行开展，卫星观测、自动监测、长期数据收集网络更为完善，“沿海-冰缘-内陆”空间梯度更加清晰，站点功能从科研拓展至补给、通信、紧急救援、综合支撑，技术体系从抵御自然环境转向装配化、模块化、数字化、智能化以实现精细适应与高效运维。

在国际实践方面，南极形成了规模化、体系化的科研站网，如美国麦克默多站^[11,12]、德国诺伊迈尔III站^[13]、英国哈雷VI站^[14]、澳大利亚戴维斯站^[15]等持续开展设施智能化和可持续化迭代^[16]；北极科研与资源开发并行，基于固定平台、浮动平台、岸基设施形成复合应用场景。技术创新成为极端环境应对能力增强的关键手段，如耐低温材料、常规高性能混凝土、真空绝热构件等围护相关技术，高架或通风地基与控热设计，工厂预制与模块化拼装，机器人吊装、自动焊接、增材制造、智能监测、多能互补、数字孪生等技术的探索与应用，显著提升极地工程的建造效率与运行可靠性。围绕原位资源利用、系统能效提升、运行保障的工程探索，也使极地成为研究极端环境工程问题的重要试验场，在理念层面与地外工程研究形成了一定的参照关系。

我国高度重视并积极参与极地事务。《北极政策白皮书》（2018年）^[17]明确，中国作为近北极国家，将在科学研究、生态保护、资源利用、航道管理、国际合作等方面积极参与北极事务，注重依法参与治理、尊重北极国家主权、推动多边合作与可持续发展。对于南极，发布官方报告和规划，确立科研考察、站网建设、生态环境保护、国际合作的主要方向，以《南极条约》体系协商国身份参与全

球治理^[8,9]。设立专门管理机构, 统筹领域规划、政策制定、国际协调, 形成南北极综合管理体系。南极站网包括长城站、中山站、昆仑站、泰山站、秦岭站, 北极设有黄河站、中冰站, 形成“沿海+内陆、常年+夏季、科研+补给”的网络布局, 依托“雪龙号”“雪龙2号”极地科考船开展常态化的综合调查, 实现科研与补给保障能力的协同发展。

尽管国内外在极地工程建造方面取得了显著进展, 但现有研究与工程实践仍存在明显局限。极地工程面临全寿命周期的不确定性挑战: 超低温导致金属脆化、混凝土早期受冻, 冻融循环、风沙冰蚀等加速材料老化^[18,19]; 冰盖运动、冻土退化引发地基条件的时空波动, 结构长期安全性承受考验; 施工窗口短、运输链脆弱, 施工高度依赖快速装配和精益组织; 能源自持困难、极夜储能受限, 运维难度大, 远程监测与主动诊断能力不足^[20]。气候变暖叠加海冰退缩、冻土退化、海岸侵蚀等过程性风险, 使既有设施面临适应性再设计与迁移压力。也要注意, 包括智能建造、多能互补、数字孪生、绿色低碳、闭环系统等在内的新一轮技术与模式变革, 正在推动极地工程由单项技术叠加向系统集成与体系重构发展。整体上, 极地工程建造进入由规模扩展向质量提升、单项技术突破向系统集成优化转型的关键阶段。

本文围绕极地工程建造, 在文献综述与典型案例分析的基础上, 从极端环境约束与工程需求出发, 系统回顾极地工程的发展历程与技术演进脉络。遵循国际代表性、工程特征可对比性、资料可靠性原则选取典型案例, 重点梳理国际极地工程在站网布局、建造模式、运行维护、能源保障等方面的实践特征与技术趋势; 结合我国极地工程建设的现实基础与政策背景, 总结阶段性进展和面临的核心瓶颈。进一步从材料、结构、建造、运维、能源等要素耦合视角出发, 凝练极地工程全寿命周期涉及的关键科学问题与工程实施挑战, 探讨装配化、模块化、数字化、智能化、绿色低碳技术对极地工程体系重构的支撑作用, 提出面向未来极地工程可持续发展的技术方向与系统路径。相关内容可为极地工程建造的理论深化与工程实践提供参考, 也是发挥极地工程在可持续建造、极端环境工程研究与国际协作等方面示范作用的基础。

二、极地工程建造的发展现状与突出问题

(一) 国际发展现状和经验

极地工程建造既是人类探索自然极限的科学实践, 也是一个国家维持极端环境下的长期存在、参与国际事务与规则塑造的重要工程基础。极地工程经过100多年的演进, 已从原住民因地制宜的简易建筑发展到以现代科技为支撑的多功能科研基地, 规模化和体系化的发展趋势鲜明。当前, 国际极地工程呈现多元并进的发展格局, 既受科学探索、国家战略的双重驱动, 也折射出技术进步、地缘竞争的深层逻辑。南极和北极虽然在自然条件、战略定位上有所差异, 但均是科学研究、国家战略、能源转型、国际合作的重要载体^[21,22]。整体来看, 可从空间布局、建造技术、功能模式、治理趋势四方面梳理相关国际经验。

1. 空间布局

南极和北极的基础设施分布从早期的零散建造演进为层次分明、网络化协同的体系。鉴于不同的统计口径存在差异, 文中在讨论科学考察站/基地时采用“考察站”为主的常规口径。南极现有80余座考察站(常年站与夏季站合计), 具有由沿海冰缘到冰盖腹地梯度分布的特征^[23]。沿海站如法国迪蒙迪维尔站、日本昭和站, 依托海上补给开展气候、海洋、生态长期观测, 构成区域科研节点; 内陆站如俄罗斯沃斯托站, 支撑深冰芯钻探和天文观测, 体现极端环境下工程与科学能力的极限。北极地区的空间布局更具复合性, 科研监测、资源开发、航道保障等功能目标并存。挪威斯瓦尔巴群岛站点、加拿大北极高纬岛屿站主要服务冰川动力学和生态监测; 俄罗斯在北极航道、大陆架沿线规模化部署油气平台、浮动基地、军事前哨, 既面向资源战略又巩固通道控制。这种“科研中心-补给枢纽-战略节点”的多层次格局, 反映出极地空间布局已经超越科学考察的范畴, 成为综合体现国家存在与战略能力的重要网络(见图1)。

2. 建造技术

国际极地工程加速由人工主导、临时搭建转向装配化、智能化、体系化^[24]。传统的木屋、钢架结构因耐久性不足、功能单一而逐渐退出, 取而代之的是高性能材料与模块化工法, 以缩短建造周期并提升运行的可靠性与适应性。德国诺伊迈尔III站采



(a) 德国诺伊迈尔III站



(b) 英国哈雷VI站



(c) 美国麦克默多站



(d) 中国秦岭站

图1 部分极地考察站的外貌

用可升降的“支腿-地基”结构，通过周期性抬升建筑高度来应对持续积雪掩埋问题，保障设施长期服役与运行安全。英国哈雷VI站进一步发展为模块化、可整体移动的站点体系，各个功能模块在冰架不稳定或裂隙风险增加时由机械拖曳并整体迁移至安全区域，体现极地工程由被动适应向主动避险的设计理念转变。北欧国家在绝热系统、绿色能源方

面持续探索，将真空绝热构件等成熟保温技术应用于站点围护结构，显著提升能源利用效率；风能、光伏、储能系统集成应用，使部分站点初步实现常态化的清洁能源供给^[25,26]。部分设施试点部署无人吊装、自动焊接、远程监测系统，显著减少人工暴露风险，提升建造与运行的安全性及效率。这些探索标志着极地工程从被动抵御转向主动控制，为未来的智能化建造与长期自持打好基础。当然，现有成果更多表现为分散式突破，尚未形成完整技术体系，导致极地建造仍处于“工程验证+有限示范”的发展阶段。

3. 功能模式

国际极地建造逐步朝着综合性、多功能枢纽方向演进。美国麦克默多站作为南极规模最大的基地，不仅承担科研任务，而且兼有后勤补给、国际合作、区域应急功能，是极地设施从科研站点向综合平台转型的代表。澳大利亚莫森站较早引入风电，是在绿色低碳与能源自持方面的先期探索。加拿大的部分高纬岛屿站点注重与原住民社区的合作，将传统生态知识与现代观测相结合，显现社会治理与科研服务的融合。欧洲国家的一些中小型站点，逐步形成“科研+教育+国际合作”的复合功能模式，体现科研与外交的双重作用。可见，极地站点逐步成为科研、补给、能源、通信、应急、合作一体化的多任务平台，功能外延仍在不断拓展。

4. 治理趋势

国际极地工程正在由分散竞争转向规则共建，相应的合作模式和制度创新不断深化。法国、意大利联合运营的康宏站是跨国共建共享的代表，在人员、资金、科研任务方面深度融合，有效降低单一国家独立承担的风险与成本。在北极理事会框架下，北欧国家推动建立数据共享 and 环境保护规范，以提升极地科研的透明度和生态保护效果。《南极条约》对废弃物处理、环境影响评估新增硬性要求，但在工程标准、能源互联、跨国救援等方面涉及较少。

(二) 我国发展现状和经验

近年来，我国极地工程建设取得由起步探索向整体“并跑”、部分领域接近国际先进水平的重要转变，基本形成科考与工程布局体系。我国极地工程的发展主要表现在南极科研站网络构建、北极科

考能力拓展、工程与技术体系持续完善三方面。

建成 5 座南极考察站，形成沿海与内陆、常年与夏季、科研与补给相结合的综合布局，为长期开展科学观测、区域补给、国际合作提供良好的基础条件^[27]。长城站、中山站是我国在南极的主要沿海科考枢纽，承担海洋环境、气候观测、后勤补给等功能。长城站位于南设得兰群岛乔治王岛，是我国最早的南极常年性站点，在南极考察体系中长期发挥着门户和枢纽作用。中山站位于东南极拉斯曼丘陵地区，邻近埃默里冰架，所在区域以裸岩出露条件较好、冰盖相对稳定为特征，是开展东南极科学考察、内陆补给的重要支点。

建设昆仑站、泰山站，是由南极沿海向内陆纵深推进的重大突破。昆仑站位于内陆冰盖最高点冰穹 A 区，是南极海拔最高、气候最为恶劣的常年性考察站之一，年均气温接近 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，运输与补给条件极为苛刻。在昆仑站建成后，具备在全球最极端环境中开展天文学、冰芯钻探、地球系统观测的能力^[28]。泰山站位于中山站、昆仑站之间，主要作为夏季站和中转站，为内陆科学考察、物资运输等提供支持。

秦岭站位于南极罗斯海区域，是南极布局中新的支点，进一步完善在南极的整体布局^[29]，显著提升在罗斯海及周边区域开展科学考察、环境保护、国际合作的综合保障能力。与原有站点相比，秦岭站规模更大、功能更完善，在设计和建造过程中更加突出绿色低碳与运行效率导向；大量采用装配化与模块化工艺，结合运用风能、光伏、储能系统，显著提升能源利用率和自持能力；配备智能化监测与运维系统，支持科研、能源、生活、安全等的综合调度。秦岭站作为多功能综合基地，不仅支撑冰盖动力学、海洋生态、气候变化等科学研究，而且具备后勤补给、国际合作、应急保障等功能，与中山站在空间布局上形成东西呼应的格局。

在北极建成黄河站，位于挪威斯瓦尔巴群岛的尼奥尔松，重点开展大气、海洋、冰川、生态环境监测。我国与冰岛共建中冰北极考察站，位于冰岛北部的卡尔霍农庄，成为我国在北极地区的第二个综合研究基地，主要支撑极光与空间天气、大气科学与气象、生物学与生态学、海洋学、冰川学、地球物理学与地质学、气候变化与环境科学、卫星遥感等多学科观测研究。此外，“雪龙号”“雪龙 2 号”

极地科考船多次执行北极科考任务，支持形成“站点-航道-船舶”一体化的北极科考格局^[30]。虽然我国在北极尚未建设常年性大型综合基地，但是通过黄河站、中冰站、极地科考船的协同运行，具备长期参与北极科学研究、国际合作的工程与组织能力。

在工程与技术体系方面，我国极地建造逐步形成以耐低温材料、装配式施工、能源系统优化为主要特征的工程技术路径。钢结构装配、复合保温板材在新站建设中得到广泛应用；风能、光伏在部分站点与柴油机组互补供电，秦岭站实现多能协同与储能保障；发展模块化、快速拼装技术，在泰山站、秦岭站的建造过程中验证了相关施工模式的可靠性与效率。

基于上述探索，我国逐步积累了可推广的经验范式。装配化与模块化建造方式在极地环境中的工程适应性得到验证，有助于缩短施工周期并降低现场作业风险。绿色低碳理念在极地工程中获得探索性应用，特别是在能源多元互补、运维管理方面形成示范。应对极端环境条件的工程适应能力持续提升，如昆仑站的长期运行表明具备超低温环境下维持科研设施稳定运行的能力。这些进展不仅提升极地领域的存在感和技术水平，也为未来构建多功能综合基地、开展地外探索演练等提供现实基础。整体来看，我国极地工程建设正处于由点状突破向网络化布局、功能单一向综合支撑、经验驱动向技术驱动演进的关键阶段。通过南极五站、北极两站的布局，实现极地考察的“两极并举”，在绿色施工、装配化建造、多能互补等方面积累宝贵经验，为未来在能源、补给、国际合作、地外探索等领域拓展打下坚实基础。

（三）突出问题与挑战

1. 自然环境极端严酷，工程适应性不足

南极内陆地区气温最低可达 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，北极冬季风速常超过 30 m/s ，长期的暴风雪与极昼极夜交替，导致极地工程在热工、力学、运行条件上均面临极端挑战。在极地环境中，低温脆化、冻融循环、风沙冰蚀、紫外辐射等作用通常同步发生并相互强化，构成“材料性能退化→构件损伤累积→结构整体刚度与稳定性下降”的影响路径，进而逐步放大工程失效风险。在长期低温、冻融循环的联合

作用下，钢材的延性与断裂韧性下降，混凝土内部的微裂缝易扩展并发生剥蚀；在沿海与冰缘区域，强风雪与风沙冰蚀共同加剧围护结构和连接节点的局部损伤；在内陆冰盖区，冰盖缓慢运动与冻土退化叠加，导致地基条件呈现显著的时空非均匀性，引发基础与上部结构协同受力关系的长期变化，增加结构整体稳定方面的不确定性^[31]。这类问题虽在不同站点中表现形式各异，但作用机理具有高度共性，构成极地工程长期安全运行面临的基础性挑战。

2. 运输链条冗长脆弱，能源供应负担较大

极地远离全球主要交通枢纽，缺乏常规意义上的港口、公路、航空网络，物资和设备完全依赖有限的破冰船航线与空运补给^[30,32]。运输周期长且成本极高，易受天气、冰情、地缘形势的干扰，一旦运输中断，工程建设与人员保障将陷入被动。在能源方面，大多数设施仍依赖柴油机组作为主要的供能方式，用能成本高昂且排放负担沉重。虽然部分国家尝试部署风能、光伏、氢能系统，但受制于极夜、风暴、低温条件，清洁能源规模有限且稳定性不足，而在储能与智能调度技术方面尚未形成有效解决方案。

3. 施工窗口狭窄，建造效率存在瓶颈

南极沿海地区每年适宜施工的时间仅有两个月，内陆地区更为有限。北极的有效施工期通常不足半年。即便如此，天气突变依然可能随时迫使施工停滞，增加计划执行的不确定性。装配式和模块化施工已成为主流，但大体量构件运输不便，现场吊装和拼装精度要求极高；智能化装备与机器人施工的普及度有限，施工过程高度依赖人工经验。在效率、质量、安全的多重约束下，极地工程施工难以在规模化应用中兼顾高效率和高可靠性。

4. 运维体系薄弱，长期自持水平偏低

严寒、风蚀、紫外辐射、冻融循环加速材料老化和设备失效，导致极地设施寿命普遍短于设计预期。设施运维与维修依赖少量的窗口期，面临高昂的运输成本，难以及时响应故障。远程监测与智能诊断能力整体不足，多数设施仍以人工巡检和被动维护为主，缺乏基于全寿命周期的状态感知、性能预测、主动维护机制。这些因素在增加运行风险的同时，制约极地设施向长期驻留和综合功能平台的升级。

5. 绿色低碳压力突出，生态风险持续提升

极地生态系统脆弱、自净能力极低，任何遗留痕迹都可能长期存在并造成不可逆破坏，如早期考察站产生的大量废弃物至今仍是治理难题。多数国家在极地工程方面缺乏系统性的碳足迹核算与绿色施工标准，加之柴油机组排放、废水与固体废弃物处理不完善，增加极地环境的长期负荷，削弱极地工程在全球绿色低碳转型中的示范效应。在极地工程发展与生态环境保护之间取得动态平衡，仍是悬而未决的问题。

6. 国际合作待深化，工程标准体系与制度支撑不足

极地是全球共享空间，但各国在设计理念、施工工艺、能源利用、环境保护方面不尽相同，尚未建立统一的工程标准与协同机制。不同国家的极地设施难以互联互通，资源利用效率偏低，构成跨国协作的壁垒。随着地缘竞争加剧，极地工程合作环境趋于复杂，现行的《南极条约》、北极理事会框架在工程技术标准、设施共建、跨国应急协作等方面约束力有限，难以全面支撑未来极地工程的规模化、体系化、协同化发展需求。

三、极地工程建造的发展趋势

极地工程建造的未来发展不仅是应对极端自然环境的工程技术问题，而且是人类社会在气候治理、能源转型、科学探索、文明延伸方面需要应答的综合性议题。从全球视角来看，极地工程建造逐步由单点突破向系统集成、局部设施向综合平台、国家竞争向规则共建的格局转变。

（一）任务牵引与功能拓展

极地工程的功能定位正在经历深刻转型。过去，考察站通常承担单一的科学研究任务，主要用于冰雪观测、地质取样、大气环境监测等，工程建造多以满足特定科研需求为核心目标。然而，随着全球气候变化趋于严峻、国际地缘竞争不断加剧，极地设施承担的作用不再局限于科研，而是向兼具科研、战略、治理属性的综合性平台演进。未来的极地基地将集科研、后勤、通信、能源、安全保障等功能于一体，成为多任务集成的战略枢纽。

这种功能拓展首先体现在科研任务的复杂化。

实施冰芯钻探、长期气象监测、极夜观测、深海调查等任务,需要设施具有高稳定性和高可靠性^[33,34]。相较短期观测,长期序列数据获取更加依赖工程系统的耐久性与可维护性。设施还需满足新兴科研需求,如生态保护与生物多样性监测、极端环境下生命活动研究/地外环境类比实验等,推动极地基地逐步发展成为跨学科的综合研究平台。其次,补给与后勤功能愈发重要。随着站点向内陆推进,沿海与内陆之间的运输链条将显著延伸,基地需要承担区域性补给与人员中转任务。再次,极地设施应具备应急与救援能力以应对突发灾害、事故或极端天气,将发展成为区域性的安全屏障与风险缓冲节点。最后,极地基地将作为国际合作与技术验证平台,在新能源应用、智能运维、闭环系统实验等方面承担先导性任务。

极地工程建造的目标已从满足科研需求上升到服务国家战略、支撑全球治理。考察站的形态将逐步转向综合性基地,由单一学科研究平台转变为多功能、跨领域的战略支点,推动极地工程建造进入新的发展阶段。

(二) 地域纵深与复杂环境扩张

现有的大多数极地工程集中在沿海与冰缘地区,如中国中山站、日本昭和站以及各国位于北极圈内的浮冰观测站。这类空间分布格局与交通可达性、补给条件、早期工程能力密切相关,使沿海与冰缘地区成为极地建造启动最早、分布最密集的区域。随着科研目标深化、战略需求拓展,极地建造将向内陆纵深推进^[35-37]。

南极内陆地区(如冰穹A)气温常年低于 -60°C ,极夜持续时间超过半年,具有极高的科学价值,是进行天文学观测、深冰芯钻探、极寒材料实验的最佳场所。虽然冰雪覆盖广阔,但几乎没有可直接获取的液态水,生活与科研用水只能依赖融冰、雪水净化或循环利用系统,导致工程系统在能源供给、设备稳定性、环境保护方面面临显著高于沿海站点的要求。北极高纬地区分布着大面积的永久冻土和复杂的海冰环境,既是气候变化的敏感区,也是地缘竞争的关键区。在此类区域布局科研设施与试验平台,成为多国极地战略的重要内容。

向极地纵深推进,意味着工程建造的难度显著增加。首先,运输与补给难度极大,任何物资和人

员的调入都需要长链条、多环节的精密组织,工程系统对物流可靠性、应急冗余的依赖性进一步提高。其次,材料与结构应具备极端韧性和耐久性,以在超低温环境下保持性能稳定,抵御冻融循环与冰盖运动的不确定性。再次,能源与水资源的双重自持成为核心,柴油机组难以为继,需要依赖风能、光伏、氢能等清洁能源的组合应用并辅以高效储能与智能调度技术;同步发展融冰制水、废水循环利用与高效净化技术,更好维持长期生存和科研活动。最后,人员驻留与保障极具挑战性,长期封闭环境、极昼极夜交替对人员心理健康和生命保障系统提出严苛要求。

极地内陆站点建设,既是科学研究的客观需要,也是检验一个国家在极端环境下工程组织、系统集成、长期运行等能力的“标尺”。由沿海转向内陆,意味着极地工程建造将从以工程可行性为核心议题转向以系统极限为约束的综合挑战,牵引材料科学、结构工程、能源系统、智能建造技术的协同突破与体系化提升。

(三) 智能化与可持续发展

未来的极地工程建造,必然向技术深度融合、绿色可持续的系统化建造模式转型。在极端环境、施工窗口有限、能源紧缺、生态脆弱的多重约束下,传统的“加厚加固”建造思路不再适用,而应依托材料、结构、施工、能源、运维、数字化方面的协同创新,提出智能化、无人化、低碳化的一体化解决方案^[38,39]。

以建造方式革新作为首要突破口。未来的极地设施将以工厂化预制、模块化拼装模式为主,以最大限度地减少现场湿作业与人工暴露。结合应用标准化接口、模块化单元、自动化吊装设备,以在有限的施工窗口内高效开展装配。发挥增材制造、原位资源利用技术结合应用的潜力,在短时间内制造个性化构件,或者直接利用冰雪、冻土作为建材形成“部分自给”建造模式^[40,41]。这些探索将显著降低对跨洋运输的依赖,提升极地工程建造的灵活性与可持续性。

数字化、智能化将贯穿极地工程建造与运维的全过程。应用材料与环境数据库、施工仿真与数字孪生平台,在实施前进行方案推演与优化。在施工中依托无人运输、远程操控、自动化拼装,形成

“远程决策+现场无人执行”新模式。在运维阶段，以智能传感网络、卫星通信、人工智能诊断为支撑，实施结构应力、能源运行、环境参数的实时监测，同步预测寿命与故障趋势，减少人工巡检需求，提高长期自持与适应能力。以智能化、数字化方式提升极地工程建造效率、提供持续可靠的运行保障^[42]。

将绿色低碳理念作为建造体系的硬约束与追求方向。在极地工程的立项阶段即进行全寿命周期碳足迹评估，明确碳预算和生态红线，将材料生产、运输、施工、运维、退役各环节纳入低碳核算框架。在施工阶段，普及装配化和干法工艺，推广电驱设备和低温友好工法，减少能源消耗并降低环境负荷。在能源系统方面，加快构建基于风、光、氢、储能的多能互补能力，结合智能调度与余热回收，逐步降低对柴油机组的依赖，实现长期低碳自持。在运维阶段，通过闭环管理实现水、能源、废弃物的循环利用，确保生态环境扰动最小化。

未来的极地工程建造不再是单一学科的延伸，而是材料科学、建筑工程、机械装备、能源系统、信息技术的深度耦合应用^[43]。基于技术融合与绿色可持续发展理念塑造全新的建造逻辑：既可在极端环境下高效、安全、智能地运行，又能成为全球气候治理与可持续发展的示范样本。由此，极地工程从被动适应转向主动塑造，成为人类探索极端环境与未来地外空间的前沿平台。

（四）国际协作与规则共建

极地是全球共享的公共空间，单一国家无法凭借自身力量独立支撑长期、复杂的工程建造与运维任务。未来的极地工程必然以国际协作与规则共建为基础，以降低成本和潜在风险，推动全球治理与可持续发展^[59]。

标准化和规范化是国际合作的基本前提，不仅有助于降低重复投入、避免资源浪费，还能为跨国救援、共享能源、联合科研提供技术与制度基础。各国在材料性能、施工工艺、能源利用、废弃物处理等方面存在明显差异，造成各自设施之间难以兼容、协同效率低下。从低温韧性材料评价、碳排放核算方法、废弃物回收处置、能源系统接口等方面着手，逐步探索统一和互认的技术标准与规范体系，使各国的极地设施具有互操作、功能互补的基

础条件。

在合作模式上，多功能共享基地、联合物流网络渐成趋势。未来的考察站和综合基地将不限于本国使用，在规划和设计阶段即预留多国共享功能，成为跨国通用的科研、能源、通信平台。通过破冰船队、航空补给点、区域仓储设施的协同，构建联合物流补给体系，形成高效且安全的跨国运输网络，避免重复建设和低效消耗。共建并互联区域能源微网，使清洁能源系统具备跨国站点的互补能力，提升区域内供能的稳定性与自持水平。

应急与安全协作是提升体系韧性的关键点。极地环境难以预测、突发性强，一旦出现能源中断、设备故障、医疗紧急情况，单一国家的站点往往难以及时应对。实施跨国救援与应急协作，如开展联合演练、建立应急物资储备、共享救援装备和指挥机制，可在面临突发事件时实施快速响应、提供资源互助，显著提升极地工程的整体韧性与安全保障能力。

开展国际协作与规则共建，为极地工程可持续发展提供制度保障，构成全球治理体系创新的组成部分。极地工程将成为国际社会在绿色建造、能源互联、应急响应方面的“试验田”，推动合作模式从竞争走向共建、资源消耗走向效能优化、单个国家利益走向人类共同未来。

（五）地外探索与文明延伸

极地工程既是人类在地球极端环境中的生存实践，也被普遍视为面向地外建造的技术验证与工程演练平台。极地工程建造技术与治理层面的各次突破，都为人类探索更深远区域极端环境提供前置经验。未来应以极地为过渡，逐步探索由地球极地迈向月球实验基地，再延伸到火星等地外星球长期居住的发展路线。地外探索与文明延伸可在工程技术层面概括为4个阶段：在极地环境中系统验证新材料、新结构、智能建造技术；将成熟成果迁移至地月空间，建设实验性小型基地；在火星等地外星球复制并扩展闭环生态模式，探索中长期驻留；在长期演进中推动人类形成多星球协同生存的文明形态。

1. 资源利用的地外化延伸

极地建造的核心方向之一是原位资源利用，在工程理念和技术路径上可与月球、火星等地外星球

的资源利用形成衔接。在极地，率先探索雪冰压实、冻土固结、冰雪制氢等工艺，建立“资源加工-材料成型-结构搭建”的完整链条^[44,45]。在降低极地工程对长距离运输依赖度的同时，为理解月壤制砖、火星冰层开采和水电解制氢等提供工程层面的类比参考。从工程研究的角度看，极地更适合作为资源利用技术的验证与对比环境，而非地外工程技术的直接替代场景。

2. 无人化施工与远程操控演练

未来的极地建造应彻底突破人工依赖，发展全流程的机器人施工和远程操控体系。在极夜、暴风雪以及无人值守条件下，利用无人吊装平台、增材制造机械、自动运输雪地车开展建造成为极地工程探索的重要方向。在卫星通信、遥感技术的支持下，极地将成为检验“地面远程指挥+外场无人施工”模式的最佳场景。该模式一旦在极地条件下得到充分验证，将为月球背面、火星地表等环境下的远程建造与控制提供直接借鉴。

3. 基地形态的系统化与生态化

未来的极地建造应摆脱单点式考察站的局限，发展成为居住、科研、能源、通信、应急于一体的小型闭环生态基地。在有限空间内实现能源循环、水循环、空气调节，从工程角度验证向相对自给自足运行状态过渡的可行性。通过极地基地演练封闭生命保障系统，为未来地外星球长期居住实验提供工程模型与运行经验。极地的寒冷、极昼极夜、能源稀缺等条件与地外环境高度相似，故极地闭环生态基地可作为地外居住系统的前期验证平台^[46]。

4. 将材料与结构的地外适应性测试作为重要拓展方向

未来的极地建造可重点开展面向极端环境需求的材料与结构实验，首先服务极地工程自身的需求，再为理解极端环境下材料与结构的可靠性问题积累基础认知。例如，利用极地环境测试低温高韧性钢、超高性能混凝土、纤维复合材料的寿命表现，验证低温、紫外、风蚀条件下的耐久性；探索膜结构、可展开壳体、轻质复合舱的快速部署性能；开展功能化材料的长期服役试验。

5. 治理模式与国际合作的前瞻研究

未来的极地工程不宜停留在单一国家独立建设的模式层面，而是向多国协作与设施共享模式过渡。鉴于地外基地开发必然涉及多国参与与共同治

理，在工程组织和治理逻辑方面极地工程建造与地外基地建设具有高度一致性。极地工程未来可以作为国际合作的试验场，探索标准化设计、联合物流、共享能源、应急救援等跨国任务模式。通过极地工程形成共建、共享、共管机制，为人类在行星基地建立多国共管模式积累先期实践经验。

四、服务国家需求的极地工程建造发展构想

在全球气候变化加剧、极地事务治理深化的背景下，极地逐步从单一的科学考察空间演变为气候调节、科学研究、国际治理于一体的战略区域。我国在相关政策与规划中提出，持续加强极地科学研究能力与基础设施保障水平，积极参与极地事务的国际合作与全球治理进程。在相关总体导向下，极地工程不仅是支撑极地科学考察和长期运行的技术基础，也是落实国家极地战略、提升极地活动安全性和可持续性、增强国际协同能力的现实依托。围绕极地科学研究、环境保护、国际合作等方面的需求，构建系统化、可持续的极地工程建造体系是具有紧迫性的关键课题。

（一）基本构想

极地工程长期受到极端气候条件、生态环境敏感性、物流与能源保障受限、国际规则约束等因素的耦合影响，建设与运行面临的问题难以采取单一技术突破或局部优化方法加以解决。应从整体层面出发，明确功能定位与发展目标，统筹工程需求、技术路径、资源配置、环境约束，以提升极地工程体系在全寿命周期内的安全性、可靠性、可持续性。也有必要提出覆盖规划决策、工程建造、长期运维的极地工程建造发展构想，为进一步的技术体系构建与工程实践提供清晰框架。极地工程的发展构想可表征为：以需求牵引、科技驱动、绿色约束、合作共建为核心且相互衔接的4个支点，辅以标准法规、人才组织、数字化与数据治理3类横向支撑，共同构成支撑极地工程长期运行与持续演进的系统闭环。

在上述系统框架中，科学设计范式是将任务需求转化为工程技术路线与标准体系的关键。极地工程面临超低温、强风雪、冻融、冰蚀、地基时变等因素耦合的不确定性场景，单纯依赖经验放大或局

部加固的处理方式往往导致冗余失衡与资源浪费，有必要建立贯穿策划、设计、评估、标准化等环节的闭环流程，推动极地工程技术体系从分散突破转向形成可复制、可推广的体系化能力。在策划阶段，以任务谱系、站网功能定位为牵引，明确环境边界、运输链约束、施工窗口，形成可量化的性能目标与约束条件。在设计阶段，采用面向性能的反演式设计方法，将韧性、可修复、装配效率、能源与水资源自持周期、碳预算等指标映射到材料选型、结构体系、模组接口、能源-水系统配置。在评估阶段，依托多灾耦合模拟、极端环境试验、数字孪生推演，验证全寿命周期内的安全、功能、低碳、可维护等性能，将验证结果进一步固化为标准条款、构件库、实施指南。

在上述设计范式中，全寿命周期碳足迹评估应作为一项基础性且不可规避的约束条件。相关的全寿命周期碳足迹核算侧重方法论框架构建（支持系统识别并比较不同工程路径的排放来源与相对差异），而非开展具体的定量计算。极地工程的碳足迹涉及材料生产与装备制造、运输与施工、运行与运维、退役与回收4个主要阶段，在极地环境中各阶段的碳排放特征均不同于常规工程，应在方案比选、技术决策时作为重要的约束条件。在此基础上，碳足迹评估应与结构安全、功能可靠性、自持周期等性能目标协同考虑，作为材料方案、结构体系、能源配置路径的比选依据，也为极地工程技术路线优化提供方法论支撑。

1.4个支点

需求牵引、科技驱动、绿色约束、合作共建4个支点，分别覆盖目标、手段、约束、组织4个层次，共同构成发展闭环。确保极地工程在战略上有方向、在技术上有依托、在环境上有约束、在组织上有支撑，为由试点探索迈向体系化布局、分散突破迈向规模化部署提供统一逻辑。

(1) 需求牵引：以任务为核心组织创新

极地工程建造需从供给推动转向任务牵引，以使命需求作为创新逻辑的核心立足点。极地工程由沿海逐步延伸至内陆，环境愈加严苛，运输和补给难度显著增加，而科研、能源、补给、应急、国际合作等任务叠加。这就要求建立系统化的任务驱动框架，将极地工程的使命定位、功能需求、性能目标、约束条件逐级分解为可量化指标（作为工程设

计的基础输入），再通过设计反演与多层级评估验证形成闭环流程，指导材料、结构、建造、运维等方面技术路径的选择。

围绕上述指标，推动形成需求、技术、产品的对应关系，通过小规模样板工程或功能舱试点来逐步验证材料性能、结构体系、施工工法的适配性，再扩展到大规模工程建设，以降低一次性重大投入可能面临的技术风险。建立分阶段评估和动态调整机制，在各个阶段检验目标完成情况，再决定是否进入下一阶段，确保研发、设计、施工始终与战略目标保持一致。采用任务驱动、指标量化、逐步迭代的路径，极地工程才能在由沿海走向内陆、单一功能迈向综合平台的进程中方向明确、效率最优、成果可靠，确保从生存维持转向战略支撑。也应注重将阶段性成果沉淀为工程标准与技术规范，促进任务牵引转化为可执行、可监督的工程规则。

(2) 科技驱动：以平台化研发突破工程瓶颈

极地工程应依托科技进步实现跨越式提升，相应的系统解决方案涉及4类关键组合：适寒材料和高效围护增强热工性能，保障人员与设备在极端气候下的稳定运行；韧性结构和控热地基增强安全冗余，应对风雪荷载、冻融循环、沉降与地基变形带来的不确定性；预制拼装和智能装备突破施工窗口期短、人力受限的瓶颈，支持快速且安全的装配式施工；能源系统和运行管理技术协同优化，为长期自持运行提供支撑。由此构成从材料到结构、从施工到供能的闭环，推动极地工程建造从被动抵御转向主动塑造。

为支撑上述系统解决方案，需重点建设3类研发平台。① 共性试验平台，包括极寒风洞、冻融循环模拟、紫外与盐雾耦合环境舱、低温焊接与连接可靠性试验台，支持开展多尺度、多工况的系统验证，适应材料、结构、工艺可靠性的研究需求。② 数字化平台，构建低温材料性能数据库、极地环境荷载与数字孪生场景库，结合施工仿真与物流-进度优化模型，贯通包括设计、制造、运输、装配、调试、运维等环节在内的全流程。③ 组织平台，包括“产学研用”联合体、“揭榜挂帅”机制、首台（套）工程计划、标准化构件库，促进极地工程领域创新成果的集成化、可复用，以技术成熟度、制造成熟度的双维度评价加速工程化落地。

(3) 绿色约束：面向全寿命周期内生低碳能力极地是气候变化的放大区、生态环境的脆弱区，实施相应工程时绿色发展不再是可选项而是硬约束。未来的建造模式需将绿色理念前置到全寿命周期中的各个环节，以实现源头低碳、过程减碳、运行自碳、回收无碳。在项目启动阶段，应建立全寿命周期碳足迹评估机制，明确项目级碳预算和生态红线，将材料生产、跨洋运输、现场安装、长期运维、退役回收等过程全面纳入核算框架，避免先建设、再修正的被动局面，确保低碳目标始终内嵌至极地工程体系。

推动绿色发展也需原位资源利用、绿色工法的联合支撑。采用压实雪土、冻固填充、水源净化、废热回收等手段，逐步减少对长距离运输的依赖，构建就地取材、就地支撑的低碳模式。普及低碳施工工艺，推广电驱动或替代燃料的施工装备，发展低温友好型工法，构建以风能、光伏为主的临建营地能源系统，在建造全过程中严格落实废弃物“零直排”和循环利用。引入绿色采购清单、过程审计制度，将环境约束嵌入招标、合同、施工等环节，确保可监督、可问责的制度闭环。

清洁能源体系是极地工程长期自持的核心支撑。加快构建“风、光、氢、储能”的多能互补能力，通过智慧能源管理实现动态调度与能效最优，逐步摆脱对柴油机组的依赖，显著降低碳排放与环境风险。由此突破制约极地工程发展的瓶颈，使能源供给成为绿色建造、长期运行的坚实保障。绿色约束既是应对环境约束的必要条件，也是推动工程体系优化的内生动力。

(4) 合作共建：以规则和互联提升体系效能

极地是人类共享的全球公共空间，相应工程建造难以由单一国家力量独立推进，而应遵循合作共建的基本原则。构建从标准到实践、从数据到资源、从补给到应急的多层次协作格局，支持提升极地工程体系的韧性与效率。① 推动形成标准共同体，在材料适寒性能、构件接口尺寸、能源互联协议、废弃物回收、碳排放核算等方面建立国际通用规范，提升不同国家设施的互操作性与兼容性^[47]。② 建设极地工程数据空间，推动环境监测、材料性能、施工工法、风险事件等方面数据的共享与互信，形成开放透明的知识共同体。③ 统筹联合物流体系，整合破冰船、空运、岸基补给网络，避免重

复建设与低效运行，提升跨国资源调度能力。建设多功能共享基地、区域能源微网，实施科研、能源、通信、应急的联合保障，降低单一国家运营的风险。④ 常态化开展跨国联合演练、灾害响应演习与应急互助、物资协同储备，增强各国互信并形成行动力。

在实现路径上，依托中立实验示范场、联合研究计划，建立“共同里程碑+成果归属协议+合规审查”机制，在合作效率、知识产权归属、国际条约义务之间取得动态平衡，降低地缘竞争不确定性带来的合作成本，将极地工程从科学技术试验场提升为工程规则与治理机制创新的重要载体。

2.3 类支撑

标准法规、人才组织、数字化与数据治理3类支撑为极地工程提供制度、能力和技术保障，增强工程体系可执行性、可靠性和持续性。

(1) 完善标准法规作为规范化和国际化的前提

极地环境极端、任务多样，如缺乏统一的标准与制度约束，则不同项目之间极易出现重复建设、技术不兼容、资源浪费的问题。建立覆盖全寿命周期的多层次标准体系，涵盖材料的低温性能与耐久性、结构的安全冗余与可修复性、施工的装配化与低碳工艺、能源的多能互补与储能体系、废弃物处理与环境保护等关键环节。明确标准体系的层级边界与适用对象，形成“通用要求-场景条款-验收方法”贯通的可执行结构。建立条约框架与合规审查机制，推动相关标准具备强制执行力和国际互认性。在实践层面，优先从可落地的工程文件入手，制定绿色建造规范、极地设施运维指南等系列标准，逐步推动分散化探索转向体系化实施，确保跨国、跨机构工程的互操作与互支撑。

(2) 人才与组织建设保障战略落地

极地工程是跨学科、跨领域、跨国界任务，涉及材料科学、结构工程、能源系统、环境科学、信息技术、国际关系的交叉融合，对人才的复合能力提出极高要求。人才与组织建设事关极地项目的执行效率与创新能力，直接决定复杂系统在极端环境中的持续运行与应急响应能力以及工程体系可持续发展格局。在教育与科研体系中建立跨学科培养机制，实施“科研+工程+治理”一体化人才培养；设立极地专项人才计划，吸引并稳定核心团队。在组织层面，建立跨国、多专业协同的合作机制，通过

人员轮换、联合团队建设来缓解长期驻守时的心理与生理压力，提高团队的韧性与持续性。

(3) 数字化与数据治理提升效率及协同水平

数字化是实时感知、智能决策、跨国协同的关键支撑，能够增强极地工程全寿命周期中应对不确定性和风险的能力。运用数字孪生、虚拟试验、大数据平台，将设计、制造、运输、施工、运维等环节纳入统一的数据空间，开展可视化、可预测、可追溯的全过程管理，如在施工阶段基于仿真和传感开展进度优化与风险预警，在运维阶段依托智能诊断与寿命预测提升可靠性。将数据共享、合规边界同步纳入治理框架，构建开放、透明、可验证的数据治理体系，提高数据的跨国共享与互信水平，避免信息壁垒导致的重复投入与低效协作。在国际合作中基于数字化能力建立共同语言与信任机制，为极地工程从单国探索转向多国共建创造基础条件。

(二) 战略定位与发展目标

1. 战略定位

在新的发展形势下，我国极地工程建设定位于兼顾南极、北极、国际3个层面，形成“立足南极、拓展北极、参与国际”的整体格局，确保工程能力、科研布局、治理参与的协同推进。

(1) 南极方向

推动由单点突破向网络化布局的跨越，形成“东西双枢纽+内陆纵深”的极地考察站体系。长城站、中山站分别位于西风带、东风带交汇区域，是我国在南极的门户和“桥头堡”，宜继续强化科研、补给、国际合作等功能。昆仑站、泰山站作为内陆纵深布局的关键节点，代表着我国在全球最严酷环境中的科研与工程能力，应进一步完善能源自持、长期运维、深冰芯钻探等条件。秦岭站作为新建枢纽，与中山站“东西呼应”并成为我国在南极的双核心支点，支持实现沿海、内陆一体化的整体布局。

(2) 北极方向

在巩固黄河站、中冰站的基础上，逐步向航道、资源、气候观测布局延伸，提升我国在北极事务中的存在感与话语权。进一步加强大气、海洋、生态监测，形成长期稳定的观测数据链。加大对北极航道、高纬度资源区的调查力度，在科学研究、气候治理、资源勘探方面形成更具前瞻性的综合能

力。通过“站点+船舶+航道”立体布局，推动我国在北极由科研存在向战略存在的转变，为未来参与北极治理和资源利用积累经验^[48,49]。

(3) 国际层面

更加主动地在多边框架下塑造“中国方案”，提升制度性话语权。以《南极条约》、北极理事会框架为核心的极地治理体系，在工程建设、绿色低碳、数据共享等方面缺乏有效规则，我国可在材料标准、能源互联、碳排放核算、废弃物管理等方向推动形成国际共识，提出可推广、可复制的规范与模式。积极参与或牵头建设多功能共享基地、联合物流体系，推动国际合作由分散竞争转向协同共建。通过国际层面的积极举措，降低在极地工程中的制度与协作成本，逐步塑造在极端环境建造、全球气候治理方面的制度引领能力。

2. 发展目标

(1) 服务国家和全球前沿科学研究

极地工程是科研活动的物理载体、全球气候治理和国家战略存在的前沿阵地。未来的设施建设需为冰芯钻探、长期气象监测、冰雪变化观测、海洋与生态调查等科学研究提供连续稳定的硬件条件，保障高连续性、高可靠性的观测与实验；也应承担北极航道监测、南极考察站网络化运行等任务，为气候变化研究、海洋权益维护、极地科学布局提供持续的数据与成果。以此为支撑，增强我国在国际科学议题上的话语权，在国家气候政策、全球环境治理方面发挥更加积极的作用。

(2) 支持自主可控和前沿技术突破

极地工程是推进和检验国家科技自立自强的一个重要平台。在耐低温钢、超高性能混凝土、复合材料、装配式结构、机器人施工、智能运维等方向开展系统集成与工程化验证，形成自主可控、可复制、可推广的极端环境建造与运维技术体系。相关成果能够拓展应用至高山、高原、深海等恶劣环境工程，也可迁移到月球、火星等未来地外基地建设，成为迎接新一轮科技革命、参与空间探索的重要技术储备。极地建造技术将成为我国在全球工程科技竞争中提升自主创新和系统集成能力的重要标志。

(3) 成为推进“双碳”目标的国际示范

极地是气候变化的“放大器”，相应工程建设模式理应成为绿色低碳发展标杆。应在全寿命周期

碳足迹核算、原位资源利用、循环建材应用、多能互补能源体系等方面形成解决方案，推动极地设施从依赖外部转向自主维持。在降低运输依赖度、提升自持能力的基础上，发展成为在极端环境下推进“双碳”目标的重要示范，集中展示我国在低碳基础设施领域的创新能力，为全球气候治理贡献新方案、新模式。

(4) 推动国际规则共建与全球治理

极地是人类共同的科学前沿领域、国际治理的敏感区域。应以极地工程实践为依托，在强化国家存在感的基础上，深度参与国际性的规则塑造与制度建设。以多国合作方式，制定材料耐低温性能、碳排放核算、废弃物回收等方面的国际标准，建设多功能共享基地，开发清洁能源设施，力争发挥更加积极的作用，推动国际合作由并行推进转向协同共建。通过制度性参与，塑造极地治理体系中负责任大国形象，提升在全球基础设施与环境治理中的影响力。

五、推进极地工程建造的建议

(一) 宏观战略与政策部署

注重顶层设计，明确极地工程在总体战略体系中的定位。目前仅在海洋强国、科技强国、“双碳”目标等国家规划中提出了增强极端环境治理能力、拓展全球公共领域的任务安排。后续，极地工程可作为相关规划的重要组成部分，全面纳入国家科技规划、重大工程布局、相关外交政策框架，明晰极地空间在国家利益维护、科学研究、全球治理中的功能定位，建立跨部门、跨领域的一体化协同机制。结合全球气候变化、能源安全、地缘竞争格局演变的新趋势，将极地工程定位为绿色低碳技术验证平台、极端环境工程能力展示“窗口”、国际合作实践载体，促进顶层设计目标、具体工程需求之间的有效衔接。

加强跨部门统筹，形成科研、工程、能源、生态、外交的综合协调管理格局。极地工程涉及科学研究、工程建造、能源供应、环境保护、国际合作，单一部门难以统筹管理。可设立常态化的极地工程统筹协调机制或专门工作平台，负责科研任务整合、工程建设协同、资金与资源配置、国际事务协调与风险评估，避免多头管理，消除重复建设，

提高资源配置效率，驱动任务需求与政策工具的精准匹配。

建立长期稳定的资金支持与政策保障机制。极地工程具有投资大、周期长、环境风险高的特点，仅靠科研经费投入难以维持。可将极地工程纳入国家科技计划项目渠道，探索财政拨款、专项基金、社会资本、企业参与相结合的多元化投入模式。发布专门扶持政策，如绿色建造激励机制、极地专用装备的税收优惠与采购保障机制，为极地工程项目实施提供制度性支撑。

注重人才队伍建设，提供人员保障机制。极地工程涉及诸多领域，对复合型跨学科人才提出极高要求。可依托国家级重点实验室、极地研究中心，建立跨学科培养与交流平台，开展“科研+工程+国际治理”的复合人才培养。建立极地工程人员轮换制度，配套心理健康与安全防护支持体系，降低人员长期驻守的身心风险，确保人才可持续供给。

(二) 技术体系与研发路线

通过材料、结构、建造、运维、能源与水资源全链条突破，形成相互支撑、系统集成的完整技术框架，革新极地工程技术体系与研发路线，推动极地工程从技术可行转向体系可用、标准可推。进一步推广至高山、高原、深海等复杂环境工程，为月球、火星基地建设提供工程技术储备。

材料是开展极地工程建造的基础，面临极端低温环境下的力学退化，低温、腐蚀、冻融、盐蚀等多重耦合作用对服役性能的长期侵蚀等核心挑战^[50,51]。当前的极地工程建造主要采用成熟材料，涉及的关键问题并非材料的先进性，而是极端环境下的适用性验证与长期稳定性表现。在工程上广泛采用的耐低温钢、低温工况混凝土以外，需关注极地环境中具有潜在优势的材料体系（如轻质复合材料、具备特定功能的工程材料），推动基于原位资源利用的建材研发（如利用冰雪压实形成的高密度冰砖、冻土固结作为临时基础材料）。探索性利用相变储能材料，提升建筑围护结构的热稳定性与能源利用效率，支持热量的被动调节与短期储存；应用功能化处理技术，研发掺杂纤维、气泡或盐类调控的“复合冰材”，提升强度、韧性与热稳定性，降低能耗和维护成本^[36,40,52-54]。经针对性设计的高韧性钢材、纤维增强水泥基复合材料表现出改善低温

损伤、延缓劣化的潜力，但在真实极地环境中的长期服役行为仍待持续监测与工程实证。轻质复合材料（如碳纤维增强板、铝合金蜂窝板、真空绝热复合板）强度高、重量轻、隔热性能优异，可在运输受限条件下大幅降低建造难度^[55,56]。功能化材料（如自愈混凝土、相变储能材料、形状记忆合金）初步展现出为极地设施引入“自愈”“自调节”功能特征的潜力，还需结合工程适用性与可靠性目标开展系统评估。

实施结构体系创新，主动应对极端荷载与地基不确定性。未来的极地设施兼具高韧性、自复位、轻质化、可修复特性，以抵御强风雪、冻融沉降、冰盖运动的影响^[57]。自复位结构指依托预应力构件、回复力元件、功能化连接，在外部荷载消失后能够主动恢复至接近初始状态的结构体系。韧性与能量耗散结构可保证极端荷载作用下的安全冗余，自复位结构可在荷载消失后快速恢复形态，轻质化设计可降低运输与吊装难度，可修复与模块化替换可延长整体寿命。综合运用结构建模、数字孪生技术，在建造前全面评估环境荷载、地基演化、服役响应的不确定性，据此优化结构形式与连接构造，为极地工程提供更高的安全性与运行韧性。

建造模式全面转向装配化、模块化、智能化^[58,59]。面向极地建造施工窗口短、环境恶劣的突出瓶颈，以预制构件、模块化拼装为核心，通过机器人吊装、自动焊接、智能拼装系统保障施工精度与效率，尽量降低现场湿作业的比例。增材制造、原位资源利用深度结合，基于轻质材料在现场快速成型个性化构件，直接利用冰雪、冻土、回收废弃物进行实验性增材制造，构建储藏舱、隔热墙体等辅助设施。在显著降低运输与施工成本的同时，为未来地外基地的“在地制造”模式提供工程验证场景。在无人施工装备、数字孪生技术的成熟度进一步提高后，极地建造将实现由少人值守向高度无人化的转型。

运维体系能力事关极地设施的长期可靠性。恶劣环境下的材料老化、设备失效、能源中断等风险通常超出预期。以智能感知、远程诊断、无人化维修为核心构建新型运维能力，如传感器网络与物联网实时采集温度、应力、能耗数据，卫星通信、人工智能算法支持寿命预测与健康诊断，减少对人工巡检的依赖。无人化维修装备、远程操控平台可在

极夜或风暴条件下执行任务，稳定保障设施的运行安全。实施全寿命周期的数字化闭环管理，逐步转向自适应、自组织的极地工程运维模式，推动真正意义上的长期自持与可持续发展^[60]。

能源与水资源体系是保障极地工程长期运行的核心环节。传统的柴油机组因高碳排放、高成本而难以适应未来极地工程的需求，因而依托清洁能源与储能技术进步，构建“风、光、氢、储能”多能互补格局并辅以智能调度与余能回收，作为极地能源动态稳定供给的主导方向。在极昼条件下充分利用光伏，在极夜、风暴期间通过风能、氢能、燃料电池实现供能平稳切换。同步建设水资源获取与循环体系，发展电解制氢副产水利用、低能耗冰雪融化设备、高效膜分离与循环净化技术，形成能源与水源的闭环系统，逐步摆脱对外部燃料和水源的依赖，形成低碳自持、能源与水资源保障的综合体系。

（三）工程示范与基地建设

极地工程建造的发展不能停留在理论和实验室阶段，而是依托样板工程、综合性基地的实际应用，开展技术验证、模式固化和经验推广。未来可优先建设一批具有国际影响力的综合性科研基地，以新型材料应用、绿色低碳施工、智能化运维、多功能平台为重点，逐步形成可复制、可推广、体系化的极地工程建造模式，“以点带面”提升极地工程整体水平。

在考察站新建与扩建过程中，优先应用前沿技术，发挥绿色与智能建造“试验田”的作用。在围护体系中，率先使用低碳混凝土、真空绝热板、气凝胶复合材料等高性能建材，提升热工性能和耐久性。在施工环节，全面推广装配式、模块化工法，减少湿作业与长周期施工。在关键工序中，引入机器人吊装、无人焊接、智能拼装，提高施工效率与安全性。在适宜场景中，探索利用冰雪或轻质复合材料进行实验性增材制造，形成原位资源利用的可行路径。在真实工程条件下对前沿技术进行系统集成与运行评估，验证极端环境下的可靠性、施工适应性、运维可行性，支持在极短施工窗口期内建成安全、绿色、智能的考察站，推动极地工程建造由经验驱动转向技术驱动。

逐步将考察站升级为具有科研、能源、通信、

应急等功能的综合性基地。在科研方面,基地支持长期气象观测、深冰芯钻探、海冰与冰盖监测、极地生态等研究,成为全球气候治理、地球系统科学的重要支点。在能源方面,建设以风能、光伏、氢能为核心的多能互补体系,结合应用先进储能装置、智慧能源管理,提供低碳自持的能源保障。在通信方面,依托卫星互联网、低轨通信星座、地面基站构建立体化网络,确保科研数据、应急信息的可靠传输与共享。在应急方面,基地配备医疗物资储备、无人机、无人雪地车等,可在有限外部支援条件下维持基本运行与区域响应能力,面向极端天气或突发事件承担应急救援与补给任务,成为区域性安全枢纽。

注重发挥示范基地在标准化、体系化方面的引领作用。对示范工程进行系统总结和技术归纳,形成覆盖设计、施工、运维、环境保护的标准化建造体系,推动极地工程建造由单点突破迈向体系构建。经工程验证形成的技术路径和标准体系具有良好的可迁移性,复制推广至其他极地工程建造,同步服务青藏高原、深海平台等其他极端环境工程,最终形成面向多种极端环境的通用技术框架。

极地的气候严酷性、能源稀缺性、交通孤立性与月球、火星等地外星球环境高度相似^[61]。极地示范基地既是科学研究与重大战略的支撑平台,也是人类文明向更广阔空间延伸的技术孵化器。在极地率先实现绿色建造、智能施工、多功能运行,为地外探索提供前置演练场,为验证未来地外基地建设相关的原位资源利用、无人化施工、闭环保障系统等提供现实条件。

(四) 国际协作与治理规范

极地具有全球共同利益属性,如生态环境的脆弱性、科研活动的国际性、地缘安全的敏感性,极地工程需依托国际合作和制度规范进行建设与运营。当前,极地工程的国际协作水平与标准化程度依然有限,不同国家的设计理念、施工工艺、材料选择、环境保护措施差异显著,工程技术标准缺乏一致性,直接增加建设与运维的不确定性,制约经验共享与技术跨国迁移。

加快建立覆盖极地工程全生命周期的国际通用规范。在材料方面,制定统一的低温韧性、抗冻融循环、耐紫外线老化等标准,增强不同国家设施的

基本安全水准与耐久性。在施工方面,提出装配式建造、模块化运输、能源管理等技术要求,提高施工效率和运行稳定性。在环境保护方面,建立废弃物回收处理、碳排放核算、环境影响评估等方面的国际规则,确保极地生态不因工程活动而遭受不可逆破坏。建立必要的标准规范体系,为跨国协作提供安全与环境底线,为跨国工程协同提供技术基础,规避标准不一致带来的重复设计和低效投入。

在《南极条约》、北极理事会框架的指引下,推进极地跨国科研与工程联合项目。各国共建多功能基地,在科研、能源、通信、应急等方面开展联合保障,发挥资源集约与功能叠加的协同效应。例如,以共享物流通道的方式,提高物流整体效率,减少重复运输与补给;联合建设新能源设施,推动风能、光伏、氢能的规模化利用,降低对化石燃料的依赖度。以极地工程领域的国际合作为依托,促进国际社会在应对气候变化、保护极地生态、推动可持续发展方面形成合力^[62]。值得注意的是,极地工程的国际合作面临一定的挑战,如南极的科研和工程建设方面各国存在一定程度的竞争,北极因航道通行权、资源开发、主权归属而存在复杂的博弈;以工程标准化、绿色建造、科学合作为切入点,有助于弱化零和竞争逻辑,推动极地成为国际合作的试验场。从更长远的角度看,极地工程的规范化和国际化具有示范意义,相关工程实践可为未来的地外基地建设提供宝贵经验^[63,64]。

六、结语

本文从全球极地工程发展的历史演进与现实挑战出发,厘清了极地工程由单一科研保障向综合战略工程转型的内在逻辑,揭示了当前极地工程在极端环境适应性、建造效率、能源与运维保障、绿色低碳约束、国际规则体系等方面存在的结构性瓶颈。针对上述问题,提出了服务国家需求的极地工程建造发展构想:在总体思路上,以需求牵引、科技驱动、绿色约束、合作共建为纵向主线,以标准法规、人才组织、数字化治理为横向支撑;在空间与功能格局上,强调南极双枢纽与内陆纵深协同、北极立体拓展、国际规则共建的协同推进;在实施路径上,侧重材料、结构、建造、运维、能源、水资源全链条技术突破,示范工程先行引领,国际协

作深度参与。

面向未来, 极地工程亟需在极端环境机理认知、系统试验能力、工程转化路径等方面形成协同推进机制。在研究层面, 有必要加强极端环境与多灾耦合环境下材料性能演化机理、高韧性与自复位结构体系、装配化与智能建造方法、全寿命周期数字化运维技术等方面的系统研究, 推动极地工程技术与气候科学、能源系统、信息技术、系统治理的交叉融合; 围绕极地极端环境条件下基础设施的力学机理与设计理论开展系统研究, 筑牢极地工程建设的基础理论和关键技术支撑, 构建受控、可重复的极端环境模拟条件, 为极地工程材料、构件、结构体系的性能演化与验证研究提供关键实验平台。在工程应用层面, 依托典型考察站、综合性示范基地, 加快新材料、新结构、新能源、智能运维等技术的工程化验证, 逐步形成可复制、可推广的极端环境建造模式。在国际合作层面, 以绿色建造与工程标准化为依托, 积极参与并引领极地工程规则与治理体系构建, 将极地发展成为国际合作与全球公共治理的试验场。

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: December 26, 2025; **Revised date:** February 6, 2026

Corresponding author: Guo Tong is a professor from the School of Civil Engineering, Southeast University. His major research fields include performance assessment and enhancement of civil engineering infrastructure. E-mail: guotong@seu.edu.cn

Funding project: Fundamental and Interdisciplinary Disciplines Breakthrough Plan of the Ministry of Education of China (JYB2025 XDXM804)

参考文献

- [1] 陈瑜. 筑梦极地四十年 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2025. Chen Y. Building dreams in the polar regions: Forty years of endeavor [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2025.
- [2] 徐宁. 冰与海的征程: “雪龙”号极地考察三十年 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2023. Xu N. A journey of ice and sea: Thirty years of polar expeditions of the R/V Xuelong [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2023.
- [3] Hu Z Y, Shi G T, Talalay P, et al. Deep ice-core drilling to 800 m at dome a in east Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(85/86): 293–304.
- [4] 白勇, 刘大辉, 乔红东. 极地工程与航运 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2023.
- [5] Bai Y, Liu D H, Qiao H D. Polar engineering and shipping [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2023.
- [6] 袁小丹, 胡麦秀. 中国参与北极国际合作研究综述 [J]. *海洋经济*, 2019, 9(5): 29–36.
- [7] Yuan X D, Hu M X. Review of China's participation in the Arctic international cooperation [J]. *Marine Economy*, 2019, 9(5): 29–36.
- [8] Collis C, Stevens Q. Cold colonies: Antarctic spatialities at Mawson and McMurdo stations [J]. *Cultural Geographies*, 2007, 14(2): 234–254.
- [9] Nayak S. Polar research in India [J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 2008, 37(4):352–357.
- [10] 羊志洪, 周怡圃. 南极条约体系面临的困境与中国的应对 [J]. *边界与海洋研究*, 2022, 7(3): 68–86.
- [11] Yang Z H, Zhou Y P. The dilemma faced by the Antarctic treaty system and China's strategy [J]. *Journal of Boundary and Ocean Studies*, 2022, 7(3): 68–86.
- [12] 郑英琴. 探索共建南极命运共同体: 南极国际治理的发展趋势与推进路径 [J]. *边界与海洋研究*, 2023, 8(3): 90–106.
- [13] Zheng Y Q. Jointly build a community with shared future in Antarctica: The trends and paths forward of Antarctic governance [J]. *Journal of Boundary and Ocean Studies*, 2023, 8(3): 90–106.
- [14] 刘惠荣. 北极蓝皮书: 北极地区发展报告(2023—2024) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2024.
- [15] Liu H R. Arctic blue book: Report on the development of the Arctic Region (2023—2024) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2024.
- [16] Davis G A. A history of McMurdo station through its architecture [J]. *Polar Record*, 2017, 53(2): 167–185.
- [17] Campbell S, Affleck R T, Sinclair S. Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo station, Antarctica [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 148: 38–49.
- [18] Hames O, Jafari M, Köhler P, et al. Governing processes of structure-borne snowdrifts: A case study at Neumayer station III [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2025, 130(3): e2024JF008180.
- [19] Jones D H, Rose M. Measurement of relative position of Halley VI modules (MORPH): GPS monitoring of building deformation in dynamic regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 120: 56–62.
- [20] Latteck R, Murphy D J. Climatological comparison of polar mesosphere summer echoes over the Arctic and Antarctica at 69° [J]. *Annales Geophysicae*, 2024, 42(1): 55–68.
- [21] Brunn B, Nitschke A, Schramm T. New Indian research station at Larsemann hills, Antarctica [J]. *Structural Engineering International*, 2013, 23(1): 34–38.
- [22] 中国的北极政策 [EB/OL]. (2018-01-26)[2026-03-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2018-01/26/content_5260891.htm.
- [23] China's Arctic policy [EB/OL]. (2018-01-26)[2026-03-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2018-01/26/content_5260891.htm.
- [24] 闫茂鑫, 李杰, 王哲超, 等. 南极大气环境下 Q460 和 Q690 低合金钢的腐蚀行为 [J]. *金属学报*, 2025, 61(2): 297–308.
- [25] Yan M X, Li J, Wang Z C, et al. Atmospheric corrosion behavior of Q460 and Q690 low alloy steels in Antarctic environment [J].

- Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(2): 297–308.
- [19] 郭明晓, 潘晨, 王振尧, 等. 碳钢在模拟海洋工业大气环境中初期腐蚀行为研究 [J]. 金属学报, 2018, 54(1): 65–75.
Guo M X, Pan C, Wang Z Y, et al. A study on the initial corrosion behavior of carbon steel exposed to a simulated coastal-industrial atmosphere [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(1): 65–75.
- [20] Datta B K, Velayutham G, Goud A P. Fuel cell power source for a cold region [J]. Journal of Power Sources, 2002, 106(1/2): 370–376.
- [21] 陈留林, 孔嘉, 邓三鸿, 等. 国际极地科学研究概况和热点计量分析 [J]. 极地研究, 2021, 33(2): 294–306.
Chen L L, Kong J, Deng S H, et al. Analysis on overview and hot spots of polar science based on bibliometrics [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2021, 33(2): 294–306.
- [22] 杨锦坤, 孔敏, 杨扬, 等. 国内外海洋科考现状及发展趋势 [J]. 船舶, 2024, 35(6): 15–28.
Yang J K, Kong M, Yang Y, et al. The present situation and development trend of marine scientific research at home and abroad [J]. Ship & Boat, 2024, 35(6): 15–28.
- [23] 杜少紫, 任飞. 极地建筑发展综述与思考—以南极科考站为例 [J]. 世界建筑, 2024 (7): 87–93.
Du S Z, Ren F. A review and reflection on the development of polar architecture: A case study of Antarctic research stations [J]. World Architecture, 2024 (7): 87–93.
- [24] 李腾, 张宝钢, 程晓, 等. 无人机在南极科学研究的应用: 进展与展望 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(5): 651–664.
Li T, Zhang B G, Cheng X, et al. Applications of UAVs in Antarctic scientific research: Progress and prospect [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(5): 651–664.
- [25] 张维哲, 李丙瑞, 窦银科, 等. 南极清洁能源利用现状及其展望 [J]. 自然杂志, 2024, 46(5): 337–346.
Zhang W Z, Li B R, Dou Y K, et al. The current situation and prospects of clean energy in Antarctica [J]. Chinese Journal of Nature, 2024, 46(5): 337–346.
- [26] Obara S, Morizane Y, Morel J. A study of small-scale energy networks of the Japanese Syowa Base in Antarctica by distributed engine generators [J]. Applied Energy, 2013, 111: 113–128.
- [27] 中国极地研究中心相关平台 [EB/OL]. (2026-01-08)[2026-03-15]. <https://www.pric.org.cn/>.
Relevant platforms of China polar research center [EB/OL]. (2026-01-08)[2026-03-15]. <https://www.pric.org.cn/>.
- [28] Zhang N, An C L, Fan X P, et al. Chinese first deep ice-core drilling project DK-1 at dome A, Antarctica (2011–2013): Progress and performance [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 88–98.
- [29] 祝贺, 魏福海. 中国南极秦岭站建设简报 [J]. 极地研究, 2024, 36(3): 498–501.
Zhu H, Wei F H. Construction of Chinese Antarctic Qinling station [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2024, 36(3): 498–501.
- [30] 朱英富, 刘祖源, 解德, 等. 极地船舶核心关键技术现状及我国发展对策 [J]. 中国科学基金, 2015, 29(3): 178–186.
Zhu Y F, Liu Z Y, Xie D, et al. Advancements of the core fundamental technologies and strategies of China regarding the research and development on polar ships [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015, 29(3): 178–186.
- [31] Liu T T, Ding R, Ai S T. An improved intersection method for positioning and its application to dalk glacier, east Antarctica [J]. Journal of Surveying Engineering, 2023, 149: 05022004.
- [32] 寿建敏. 我国极地航运能力建设和高冰级船队发展对策分析 [J]. 极地研究, 2018, 30(4): 419–428.
Shou J M. Building polar shipping capacity and developing a high ice class flotilla in China [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2018, 30(4): 419–428.
- [33] 李亚洲, 孙友宏, 张楠, 等. 极地中深及深冰芯钻探项目进展及对我国的启示 [J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 1–13.
Li Y Z, Sun Y H, Zhang N, et al. Progress of intermediate-depth and deep ice-core drilling projects in polar regions and its enlightenment for China [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 1–13.
- [34] Wenkenbach I, Meijer E, Roper A, et al. An innovative flat-pack wharf: Overcoming construction challenges in Antarctica [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Civil Engineering, 2022, 175(1): 19–26.
- [35] 刘顺林. 中国极地考察 40 年进展与展望 [J]. 极地研究, 2024, 36(3): 317–328.
Liu S L. The progress and prospect on the 40th anniversary of Chinese Arctic and Antarctic scientific expeditions [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2024, 36(3): 317–328.
- [36] 陈连增. 中国极地科学考察回顾与展望 [J]. 中国科学基金, 2008, 22(4): 199–203, 247.
Chen L Z. A review and perspective on Chinese Arctic and Antarctic research expedition [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2008, 22(4): 199–203, 247.
- [37] Wolak R J, Johnson J C. Social dynamics in an isolated, confined, and extreme workplace [J]. International Journal of Biometeorology, 2021, 65(3): 437–451.
- [38] Araújo G, Roaf S, Guedes M C, et al. Back to the future—Reverse-designing a shelter for extreme weather in Antarctica [R]. Coruña: The 35th Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Conference, 2020.
- [39] Cantuária G, Marques B, Silva J P, et al. Low energy, low-tech building design for the extreme cold of Antarctica [R]. Edinburgh: The 33rd Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Conference, 2017.
- [40] 孙健峰, 黄俊凯, 武岳. 纸浆纤维增强冰梁受弯性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(12): 41–45.
Sun J F, Huang J K, Wu Y. Experimental study on flexural behavior of ice beam reinforced by pulp fiber [J]. Building Structure, 2022, 52(12): 41–45.
- [41] Garg A, Yerneni S S, Campbell P, et al. Freeform 3D ice printing (3D-ICE) at the micro scale [J]. Advanced Science, 2022, 9(27): 2201566.
- [42] Uhm T, Kwon J, Noh K, et al. Development of robotic system for exploration in extreme cold regions (tested in Antarctica) [J]. Electronics, 2025, 14(10): 1983.
- [43] 于立伟, 王俊荣, 王树青, 等. 我国极地装备技术发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 84–93.
Yu L W, Wang J R, Wang S Q, et al. Development strategy for polar equipment in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 84–93.
- [44] 石文博, 肖恩照, 陈涛, 等. 压实雪层跑道的施工技术现状分析 [J].

- 极地研究, 2025, 37(1): 149–161.
- Shi W B, Xiao E Z, Chen T, et al. Analysis on the current status of construction technology for compacted snow runway [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2025, 37(1): 149–161.
- [45] 孙波, 唐学远, 肖恩照, 等. 南极机场冰雪跑道工程技术发展现状与展望 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 161–168.
- Sun B, Tang X Y, Xiao E Z, et al. Ice and snow runway engineering in the Antarctica: Current status and prospect [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(2): 161–168.
- [46] Cwikla J, Milroy S, Reider D, et al. Pioneering Mars [J]. *The American Biology Teacher*, 2014, 76(5): 300–305.
- [47] 罗光富, 李丙瑞, 高源, 等. 我国极地科学考察标准化建设现状与展望 [J]. *极地研究*, 2023, 35(2): 304–314.
- Luo G F, Li B R, Gao Y, et al. Research on the status of polar scientific research and expedition standards development and its countermeasures [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2023, 35(2): 304–314.
- [48] 陆俊元. 北极地缘政治与中国应对 [M]. 北京: 时事出版社, 2010.
- Lu J Y. Arctic geopolitics and China's response [M]. Beijing: Current Affairs Press, 2010.
- [49] 杨剑. 北极治理新理论 [M]. 北京: 时事出版社, 2014.
- Yang J. New theories on Arctic governance [M]. Beijing: Current Affairs Press, 2014.
- [50] 冯晨旭, 崔腾飞, 徐璐, 等. A588 耐候钢在极寒大气环境下的腐蚀行为研究 [J/OL]. *中国腐蚀与防护学报*, 1–15 [2026-03-15]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1474.tg.20251014.1453.018>.
- Feng C X, Cui T F, Xu L, et al. Corrosion behavior of A588 weathering steel in extremely cold atmospheric environments [J/OL]. *Chinese Journal of Corrosion and Protection*, 1–15 [2026-03-15]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1474.tg.20251014.1453.018>.
- [51] 黄恒, 王艳, 李文俊, 等. 极地海洋环境对 GFRP 筋力学性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(11): 3980–3989.
- Huang H, Wang Y, Li W J, et al. Effect of polar marine environment on mechanical properties of GFRP bars [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(11): 3980–3989.
- [52] Liang G, Xiao E Z, Dong X Q, et al. Mechanical properties of Antarctic blue ice: Effects of strain rate and temperature on strength parameters [J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 489: 142178.
- [53] Wagner A M, Blaisdell G. Expedient sea ice infrastructure in a cold environment [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2022, 36(3): 05022001.
- [54] 闫明亮, 谢剑, 严加宝. 极地低温下复合冰单调及重复轴压性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2025, 46(8): 347–358.
- Yan M L, Xie J, Yan J B. Experimental study on monotonic and cyclic axial compression properties of reinforced ice at Arctic low temperatures [J]. *Journal of Building Structures*, 2025, 46(8): 347–358.
- [55] 曹百站, 孙洲, 王刚, 等. 极境之盾: 南极秦岭站超低温幕墙复合构造体系创新 [J]. *建筑技艺(中英文)*, 2025, 31(S1): 392–394.
- Cao B Z, Sun Z, Wang G, et al. Extreme shield: Innovation of ultra low temperature curtain wall composite construction system at Qinling station in Antarctica [J]. *Architecture Technique*, 2025, 31(S1): 392–394.
- [56] Phetteplace G, Weale J. A model for freeze–thaw cycling of the South Pole station exterior sheathing [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 52(2): 254–261.
- [57] 晏鹏, 李志伟, 李斐, 等. 基于远震接收函数的南极大陆冰盖厚度研究 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10): 3780–3792.
- Yan P, Li Z W, Li F, et al. Antarctic ice sheet thickness derived from teleseismic receiver functions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 3780–3792.
- [58] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 26–36.
- Liu Z S, Liu Z S, Sun J J, et al. Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 26–36.
- [59] Banihashemi S, Akbarnezhad A, Sheikhhoshkar M, et al. 3D printing in construction: Sustainable technology for building industry [J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2025, 10(12): 11729–11762.
- [60] 陈玉婷. 智能控制导向下的寒地可移动建筑研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2021.
- Chen Y T. Mobile architecture in cold regions under guidance of intelligent control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (Doctoral dissertation), 2021.
- [61] 周诚, 高玉月, 覃文波, 等. 月球基地建造的发展趋势、目标体系与政策路径 [J]. *科学通报*, 2025, 70(21): 3460–3469.
- Zhou C, Gao Y Y, Qin W B, et al. The development trend, objectives, and policy path of lunar base construction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, 70(21): 3460–3469.
- [62] Tin T, Peden J, O'Reilly J, et al. Preservation amenity, research laboratory, or mineral reserve? International perspectives on the values of Antarctica [J]. *Polar Record*, 2019, 55(2): 61–71.
- [63] 张崇峰, 王慎泉, 韩亮亮. 载人月球探测月面活动机器人的发展机遇及关键技术 [J]. *载人航天*, 2024, 30(5): 553–561.
- Zhang C F, Wang S Q, Han L L. Development opportunities and key technologies of lunar robot in manned lunar exploration [J]. *Manned Spaceflight*, 2024, 30(5): 553–561.
- [64] 冯鹏, 包查润, 张道博, 等. 基于月面原位资源的月球基地建造技术 [J]. *工业建筑*, 2021, 51(1): 169–178.
- Feng P, Bao C R, Zhang D B, et al. Construction technology for lunar bases using lunar in-situ resources [J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(1): 169–178.