科学通报 2026 年 第 71 卷 第 19 期: 4464 ~ 4474
地球科学对人类文明发展的贡献专题 观 点
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

海洋科学对人类文明的贡献

陈朝晖[1], 王嘉祯[2], 陈鹭[3], 于志腾[4], 曹知勉[5], 刘鑫[6], 张亮[7], 吴立新[1,2*]

1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100
2. 崂山国家实验室, 青岛 266237
3. 中国海洋大学党委统战部, 青岛 266100
4. 自然资源部第二海洋研究所海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012
5. 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361005
6. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
7. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085
* 联系人, E-mail: lxwu@ouc.edu.cn

自古以来, 人类一直胸怀星辰大海的远大理想. 随着宇宙飞船和载人航天技术的突破, 人类圆梦太空. 然而, 近在人类身边的海洋却依然幽秘深邃, 笼罩着神秘的面纱. 目前, 被系统观测的海洋体积尚不足5%[1]. 人类自海而生——海洋孕育了地球的早期生命, 并在地球环境经历极端变化时保留下生命的火种[2,3]. 现存的所有生灵, 包括人类在内, 其起源都可追溯至海洋. 人类社会选择缘海而居——据估计, 世界超过一半人口居住在离海洋200公里以内的海岸带区域[4], 80%的特大城市位于沿海地区[5]. 人类文明因海而兴——全球海洋经济总值每年约为2.5万亿美元, 在世界海洋强国和大国中, 海洋经济的GDP占比大多在7%~15%之间(我国约为8%)[6,7], 而受海洋和海岸带经济间接带动的GDP比例则更高, 可达40%以上[8], 加之海洋系统的生态服务功能和削减气候变化灾害等提升价值, 海洋为人类经济的贡献不可估量.

人与海洋的关系也是互馈的. 海洋中发生着跨越多个时空尺度的物理、化学、生物和地质过程, 持续塑造着地球宜居性并影响人类文明的演进方向. 同时, 自工业革命以来, 人类活动亦深刻改变了海洋的状态, 导致海洋污染、暖化、酸化、缺氧及富营养化等一系列环境问题[9]. 正是在这一复杂耦合背景下, 海洋科学逐步发展为一门综合性极强的学科, 其知识体系兼具基础性、应用性与社会性: 既研究海洋中的自然现象、变化规律及其与大气圈、岩石圈、生物圈、土壤圈和冰冻圈的相互作用, 也服务于海洋的开发、利用与保护, 并关注人类社会与海洋系统的协调发展(https://www.nsfc.gov.cn/p1/2931/3971/3975/3987/4024/dqkxsc322.html). 围绕上述核心问题, 海洋科学在揭示地球物质能量循环机理、宜居性演化与生命起源, 支撑海洋环境安全保障、极端事件预测与防灾减灾, 推动海洋资源能源开发与可持续利用, 以及评估与应对全球气候变化等方面发挥了基础性与引领性作用, 从而在和谐人海关系、促进人类社会航船行稳致远中扮演着不可替代的角色.



吴立新 中国科学院院士、发展中国家科学院院士、欧洲科学院院士、美国地球物理学会会士、美国气象学会会士, 现任崂山国家实验室主任, 中国海洋大学副校长. 长期致力于海洋多尺度动力过程、海洋地球系统观测、模拟与预测研究.

建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务. 习近平总书记指出: “建设海洋强国, 必须进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋”. “关心海洋”明确了海洋事业的群众基础和应秉持的关切态度, 也体现了海洋作为全人类共有自然资源的公共属性, 而“认识海洋”和“经略海洋”正契合了海洋科学发展的深层逻辑, 为新时代海洋科学富国强邦、造福人类擘画了路线图. 本文通过简要梳理海洋科学发展历程, 以丰富例证说明海洋科学对人类文明的多方面贡献, 在此基础上展望海洋科学未来的发展前景, 推动海洋科学与社会发展的深度融合.

1 认识海洋的历程: 从点线面体到四维时空

由于海水的天然阻隔, 早期人类往往只能望洋兴叹, 逐

引用格式: 陈朝晖, 王嘉祯, 陈鹭, 等. 海洋科学对人类文明的贡献. 科学通报, 2026, 71: 4464–4474
Chen Z, Wang J-Z, Chen Z, et al. The contribution of marine science to human civilization (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 4464–4474, doi: 10.1360/CSB-2026-0411

© 2026《中国科学》杂志社

渐形成了统治数千年的“地平说”认识. 基于日复一日的单点观测, 毗海而居的我国古人很早就描述了周期为半日的潮汐现象, “朝(潮)夕(汐)迎之, 则遂行而上”(《管子》), 并用于指导船只进出港湾. 然而, 由于视野局限, 港湾因岸界和地形造成的潮差、潮时变化, 以及中国沿海少量分布的全日潮现象, 直到较晚时期才被记载. 同样受制于地域环境, 李约瑟指出, 因地中海潮差较小, 欧洲在潮汐方面的研究进展较慢; 而中国因具备如钱塘潮这样的独特地理优势, 在文艺复兴前的潮汐认识上始终领先于欧洲[10]. 割裂的地理环境使得这一时期海洋认知是零散的, 一般是基于早期生产生活的经验描述和总结. 许多关于海洋的神话传说, 承载着先人对大海的敬畏和想象.

随着人类活动的扩展和航海技术的进步, 地理大发现和大航海时代迅速丰富了人们关于海洋的认知. 人们通过航线和航海测绘勾勒了海陆的轮廓——海岸线. 1602年明朝传教士利玛窦绘制的《坤舆万国全图》和1627年开普勒绘制的世界地图已与今时的世界地图相差无几. 这一时期, 原本分散在全球不同地理空间而只存在有限联系的人类文明, 被海洋航线连接起来, 世界历史真正成为“全球史”. 随航线累积的船测资料进一步催生了海洋领域一系列基础发现. 牛顿、拉普拉斯等基于力学原理演绎出平衡潮(1687年)、动力潮理论(1775年), 定性解释了全球的潮汐分布; 富兰克林梳理商船航线发表了湾流图(1769年), 首次描绘了西边界流的清晰图景; 达尔文分析环球科考资料提出物种起源(1859年), 根本颠覆了“神创论”和“物种不变论”; 波义尔根据取自不列颠岛屿周边的一系列水样证实海水盐度普遍存在(1674年), 改变了当时“只有表面海水是咸的”的流行看法; 拉瓦锡系统测定了海水成分(1772年), 证实海水中不只含有钠盐[11]. 到1865年, 人们已经从海水中分析出了27种元素(碘元素首次在海草灰中被发现[12]).

然而, 19世纪中叶以前的海洋学研究主要服务于航海实践, 尚未将海洋作为独立的研究主体. 1872~1876年, 英国“挑战者”号开启了一次划时代的环球航行考察. 此次考察在三大洋和南极海域进行了系统性、多学科综合观测, 推翻了“大洋深处充满4℃海水”和“300英寻(约600米)以下无动物”等错误认知, 被认为是现代海洋科学的开端[13]. 此后, 海洋研究逐渐从探索性航行转向特定海区的专门调查, 在发现新海洋现象并积累大量观测资料的同时, 也促进了观测技术的革新. 这一时期的海洋科考推动了物理海洋学、海洋化学、海洋生物学和海洋地质学等基础二级学科的形成与分化. 1942年, Sverdrup等人[11]出版的学术巨著《海洋》(*The Oceans*)系统整合了物理、化学、生物与地质等多学科关于海洋的观测事实与理论认识, 标志着海洋科学由分散的经验性研究走向多领域交叉融合的综合性学科(图1).

20世纪中叶, 密集的航线网让人类初步了解了海洋温盐浪流等基本要素的水平分布. 由于水体的阻碍, 这一时期的海洋认知大多停留在准二维和准定常状态. 对海洋的三维认识必须借助于先进的观测技术. 20世纪中后期, 侧扫声呐测深技术颠覆了以往认为“洋底地形平缓而单调”的传统观点, 揭示出由洋中脊、断裂带与深海海沟构成的复杂地形体系, 并为海底构造分区及动力过程研究提供了直接约束; 地磁观测通过识别海底磁异常条带的对称分布特征, 为海底扩张与



图 1 海洋认知深化的历程与里程碑式时间点. 图中部分元素参考网络资料并经整理绘制

Figure 1 The history and milestones of marine science. Some elements in the figure are adapted from online resources and have been modified

板块构造理论提供了关键证据, 从根本上动摇了以海陆分布相对固定为前提的槽台学说在地质学中的主导地位[14]; 卫星遥感观测则首次以全球尺度揭示了海表高度与温度的细微起伏结构, 证实了海洋中普遍存在的中尺度涡旋活动, 表明海洋环流具有显著的时空变率, 从而修正了经典环流理论所刻画的相对静态图景[15]; 同位素示踪技术(如^{14}C、^{3}H等)通过刻画水团"年龄"及其混合过程, 定量约束了深层水团的形成与输运路径, 证实了全球尺度热盐环流("大洋传送带")的存在, 为气候系统低频变化研究奠定了里程碑[16]; 深潜探测技术则使人类首次直接进入深海极端环境, 发现了热液与冷泉系统及其以化能合成为基础的独特生态系统, 揭示了地球内部能量驱动的物质循环与生命过程之间的耦合关系, 为海洋生物学与海洋地球化学研究开辟了全新的方向[17](图2).

进入21世纪, 由4000余枚Argo剖面浮标组成的观测阵列, 实现了全球上层海洋水文要素的准实时观测, 使人类初步具备了感知海洋四维时空变化的能力. 近年来, 人类向深海深渊的认知边界也取得了历史性突破. 以我国"蛟龙"号、"奋斗者"号为代表的大深度载人潜水器成功抵达万米海沟深处, 使科学家得以直接触及深海极端环境, 开展深海化能合成生态系统的精细化原位探测[18,19]. 随着人类对海洋认知的拓展和深入, 海洋的未知领域愈加广阔. 当前观测条件仍无法系统分辨海洋中快速变化的亚中尺度过程和占海洋总体积约一半的2000 m以深的深层水体的多时空变化, 并且难以深入解析海底流固交换与板块运动过程等. 这些限制严重制约了对海洋全方位四维时空变化的认知. 因此, 要推动认识海洋水平质的飞跃, 必须构建"透明海洋"立体观测网, 实现海洋的状态透明、过程透明、变化透明、目标透明[20], 才能促成海洋基础科学对人类文明的更大贡献.

2 经略海洋的实践: 从渔盐舟楫到四个面向

古代经略海洋的观念萌芽于"兴渔盐之利"和"行舟楫之便"的初步认识, 借助海洋的资源和航运属性来挖掘海洋的经济价值. 《史记·齐太公世家》记载"太公至国……通商工之业, 便鱼盐之利, 而人民多归齐." 春秋时期, 齐国凭借三面环海的地理优势, 大力发展渔盐资源, 为其成为春秋霸主奠定了经济基础. 西汉时期, 汉武帝推行盐铁专卖政策, 并开辟南海至印度洋的海上贸易航线(即海上丝绸之路), 以弥补与匈奴连年战争导致的财政赤字, 巩固了统一王朝的统治. 至宋明时期, 由于中亚战争频繁, 海上丝绸之路逐渐取代陆上丝绸之路, 成为中外贸易的主要通道. 《资治通鉴》载: "天下之赋, 盐利居半", 足见海洋资源对国家经济的重要性.

中国海水养殖历史悠久, 远早于西方建立人工牡蛎苗床的时期. 北宋时期已有"围竹养蚝"的技术, 南宋《三山志》记载福州沿海养殖蛏田达1130顷. 至明清时期, 水产养殖已高度商业化, 福建、广东等沿海地区迅速发展, 牡蛎、蚶、蛏、紫菜等成为主力品种. 在广东的海丰、汕头及湛江等地沿海, 数百年前即创造出利用港湾、港汊或沿海低洼地进行筑堤修坝建闸蓄水, 通过潮汐涨退纳入鱼虾幼苗进行养殖, 称为港塭或鱼塭养殖. 这一时期, 人们开始关注鱼类养殖与水质的关系, 并探索鱼病防治技术. 例如, 明代徐光启在鱼虱形态与防治上的研究比欧美最早的相关报道早数十年[21].

古希腊文明作为西方海洋文明的摇篮, 其地理特性决定了其与海洋的深厚联系. 由于山地丘陵多、平原少且分散, 古希腊城邦依赖海洋进行生产贸易, 并围绕海洋形成独特的

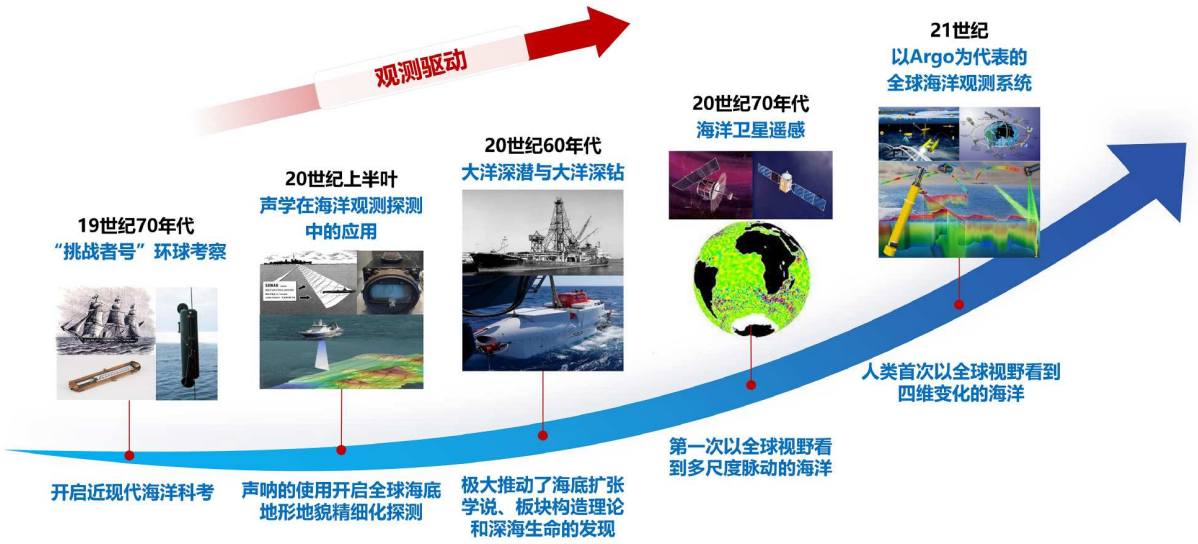


图 2 观测引领海洋科学认知飞跃. 图中部分元素参考网络资料并经整理绘制

Figure 2 Observations lead to leaps in marine scientific understanding. Some elements in the figure are adapted from online resources and have been modified

民俗与信仰. 雅典依靠海上贸易积累了巨大财富, 为其“黄金时代”的文化、科学与建筑辉煌成就提供经济基础, 同时为其早期政治制度的发展提供了保障, 成为后世西方文明的渊源.

大航海时代极大加速了商品在全球的流通, 推动全球总国内生产总值(GDP)在200年间增长4倍[22]. 然而, 直到20世纪初, 成体系的海洋科学尚未建立, 人类对海洋的开发仍局限于航运和小规模捕捞养殖. 20世纪中叶, 随着海洋工程和生物科技的进步, 海洋钻探、海洋油气和海水养殖等产业迎来了质的飞跃. 例如, 美国海域的油气勘探成功率因三维地震技术的改进而大幅提升, 储量评估的准确度也因此提升了近一倍[23]. 近30年, 全球海水养殖产量增长了五倍[24]. 2022年, 我国水产品产量达6800万吨, 与猪牛羊肉产量持平, 为1949年的150余倍[25]. 近年来, 随着海洋科学的发展, 我国海水养殖经历了“五次浪潮”(藻、虾、贝、鱼、参), 正掀起第六次海水养殖浪潮. 其核心特征是从近海向深远海拓展, 以优良品种、海洋信息技术和大型养殖装备为牵引, 强调“船载舱养+游弋养殖”“桁架类网箱”等新模式[26,27].

然而, 历史上经略海洋的过程中也暴露了因认知不足带来的灾难. 1912年泰坦尼克号因海洋环境保障不足导致的沉没事故, 成为经典案例. 1969年, 美国圣巴巴拉海峡联合石油公司钻井井喷事故造成了800平方英里的油膜污染, 是当时世界最大的海上钻井事故, 也直接催生了第一个世界地球日的诞生. 进入21世纪, 随着人类开发触角迈向深海, 极端环境带来的试错成本变得极其高昂. 2010年, 美国墨西哥湾“深水地平线(deepwater horizon)”钻井平台因对深海超高压地质环境的低估及防喷器失效, 引发了人类历史上最严重的海洋工程灾难. 超300万桶原油在海底1500米深处持续喷涌87天, 不仅对墨西哥湾深海及沿岸生态系统造成了不可逆的毁灭性打击, 更致使英国石油公司付出了逾650亿美元的天价赔偿与清理费用.

在面临环境保护和人类发展的双重压力下, 新时代经略海洋之路必须坚持四个面向: 面向世界科学前沿, 通过深化对海洋的认识, 推动经略海洋做新做强, 以科学创新引领海洋高质量发展; 面向经济主战场, 筑牢资源、能源与粮食安全屏障, 为国家经济发展注入可持续动力; 面向国家重大需求, 提高海洋环境感知与保障能力, 切实维护国家安全与海洋权益; 面向人民生命健康, 开发蓝色药库、保护海洋生态, 以绿色健康的发展模式造福民生. 通过“依海富国、以海强国、人海和谐、合作共赢”, 实现海洋开发利用与环境保护的协调统一, 为人类文明的可持续发展作出更大的贡献.

3 海洋科学的繁荣深刻变革了人类文明

地球表面约71%被海水覆盖, 被称为“水的行星”. 海洋是生命的源泉与摇篮, 是资源的宝库和人类社会可持续发展的重要空间载体. 在全球气候变化和陆地资源逐渐枯竭的今天, 人类拓展海洋新空间的需求日趋迫切, 海洋科学研究越来越关注与资源、环境和气候相关的议题, 并与社会经济发展紧密结合.

3.1 海洋科学回应了关乎人与自然演化的核心科学问题

人类发展始终需要面临着地球、生命和人类社会演化等一系列核心问题. 海洋作为地球宜居性演化的关键圈层, 与“大氧化”“生物大爆发”“雪球地球”等重大古气候与古环境事件息息相关[28,29]. 20世纪中叶Hess[30]、McKenzie和Parker[31]以及Morgan[32]提出的海底扩张与板块构造理论奠定了现代地球科学的基石. 进入21世纪, 随着国际大洋发现计划(IODP)和高精度海底地震探测技术的推进, 人类对地球内部过程的认知突破了表层地壳. 科学家揭示了海沟俯冲带作为“地球深部水循环枢纽”的关键作用[33], 进一步阐明了洋壳-地幔的流固耦合与地幔柱动力学机制[34,35]. 这些新知不仅解释了地球为何能维持长期的板块运动, 也回答了地球如何锁住水分、成为太阳系中独一无二的“水行星”等根本问题[36].

从19世纪达尔文随船科考而后提出《物种起源》到1977年深海热液喷口的发现[17], 在探索生命起源与进化领域, 海洋科学持续带来了颠覆性的认知. 海底热液喷口及随后冷泉系统等化能合成生态系统的确认, 彻底打破了“万物生长靠太阳”的光合作用铁律[37], 重塑了关于地球早期生命起源于深海极端环境的假说[38]. 近年来, 科学家进一步在海底数千米深的岩石与沉积物中发现了极其庞大且古老的“深部生物圈(deep biosphere)”. 其极度缓慢的代谢方式极大地拓展了碳基生命的生存边界[39,40], 不仅革新了生物学认知, 更为人类在太空中(如木卫二等冰卫星)寻找地外生命提供了现实的蓝本[41].

在气候系统的长期演变与人类未来命运方面, 海洋科学揭示了微观生命与宏观气候的互馈机制. 物理海洋学家Stommel[42,43]和海洋化学家Broecker[16,44,45]在20世纪60~70年代指出了深海热盐环流对地球低频气候振荡的控制作用. 1975年Broecker提出“全球变暖”概念[46], 成为自20世纪后半叶至今科学与社会的双重焦点议题. 在Volk和Hoffert[47]确立海洋碳生物泵(biological pump)概念的基础上, 海洋生物地球化学家Martin于90年代提出了著名的“铁假说(iron hypothesis)”. 该假说阐释了微量铁元素的输入如何调控高营养盐海域的生物泵效率, 进而通过改变浮游植物向深海的固碳输送, 主导了冰期-间冰期大气二氧化碳的剧烈波动[48]. 当前, 面对全球变暖加剧的现实, 海洋科学正密切聚焦于气候系统的临界点(tipping points). 最新观测与模式研究预警了北大西洋经向翻转环流可能面临大幅减弱的风险, 这为评估全球极端气候突变提供了核心的科学依据[49,50]. 海洋科学通过理论突破和实践创新, 不断解码人与自然的核心问题, 为理解地球演化、生命进化和气候变化指明了方向.

3.2 海洋科学增强了人类文明对自然灾害的抵御能力

海洋环境复杂多变，台风、风暴潮、海浪、海啸等对众多沿海城市和人口带来严重威胁. 历史上因海洋造成的人员和经济损失不计其数[51]. 2004年苏门答腊岛外海9.1级地震引发的海啸造成周边国家逾23万人死亡，促使国际社会重视海洋基础研究及海啸预警研发升级，直接推动了全球海洋观测网(如DART深海海啸预警浮标系统)与海底地震仪监测体系的建立[52]. 日本于2007年启用新的海啸预警系统在2011年东日本大地震引起的海啸中发挥重要作用，至少有90%临灾居民从预警中获益而幸免于难[53]. 根据《2023年中国海洋灾害公报》，尽管极端天气频发，但得益于预报预警能力的提高，我国因风暴潮和极端海浪造成的直接经济损失和人员伤亡连年显著下降. 在宏观气候尺度上，厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是全球最显著的气候变率. 自1987年海洋学家Cane等人第一次成功预报[54]以来，借助全球热带海洋观测网的数据支撑, 对ENSO事件的预测时效已能提前18个月[55]. 这种跨季度的前瞻性预警，使得全球农业、水利等部门能提前制定防旱抗涝策略，每年为全球挽回数百亿美元的灾害损失[9,56].

随着人类向深海进军，海底滑坡及其引发的高速海底浊流成为“隐形杀手”. 这类灾害不仅会引发局部海啸，更会对海底通信光缆、深水油气平台和海底管线构成毁灭性威胁(例如2006年台湾恒春海域地震引发海底滑坡，切断多条国际光缆，导致亚洲通信网络大面积瘫痪[57]). 现代深海地质学通过高分辨率多波束测深、浅地层剖面探测以及海底原位力学监测技术的长足进步，已经能够对海底边坡的不稳定性进行精细化三维建模与风险量化[58,59]. 这些海洋地质与地球物理探测成果成为了现代重大海洋工程选址、管线路由规划和抗灾设计不可或缺的科学依据.

受人类活动与气候变暖叠加影响，近海富营养化、有害藻华(赤潮/绿潮)以及海底缺氧区的蔓延，对近海生态系统和水产养殖业造成了极其严重的冲击[60]. 如今，海洋学家通过构建复杂的海洋动力-生态学耦合模型, 结合实时水质浮标与生态遥感网，已能实现对赤潮生消过程的动态追踪和缺氧区演变的定量预警[61]. 基于界面化学原理研发的“改性黏土原位治理技术”, 能够通过超强物理絮凝与电荷中和反应，在短时间内快速沉降致灾赤潮藻类并有效阻断毒素释放，该技术目前已被联合国相关机构推介，广泛应用于全球多个国家近海突发性生态灾害的应急扑救[62]. 此外，通过大规模应用大型海藻与滤食性双壳类构建多营养层次综合养殖与立体生态修复系统，可以高效提取并削减水体中过剩的氮磷负荷，有效遏制底层缺氧的恶化趋势[63]. 这些基于海洋大数据与先进生态技术的治理模式，促使人类的灾害应对从事后被动响应向科学治理和事前精准干预与生态环境容量控制转变. 综上所述，海洋科学的发展大幅提升了人类应对海洋自然灾害的能力, 为人类社会的繁荣和安全提供保障.

3.3 海洋科学指导了人类文明更好地利用和资源与能源

自然资源是人类生存与发展的命脉, 随着人口不断增长, 资源紧张的问题日益突出. 海洋科学驱动了“蓝色农业革命”. 当前海洋已提供了全球20%的高质量蛋白质[64]，鱼类每年可捕量达1亿吨，但传统捕捞业已接近生态承载上限. 在此背景下，海洋生物学与水产科学在遗传育种、病害防控及深远海养殖装备等方面的进展，有力支撑了海水养殖产出的快速增长. 预计到2050年，海洋食品产量有望满足全球约四分之一人口的肉类需求[65]. 此外，深海观测探测技术与分子生物学的进步，使得人类对海洋生物遗传资源基因库的认知不断深化[66]. 从深海、热液与冷泉等环境中分离获得的特异性酶及活性物质，正逐步应用于新型抗癌药物、抗生素及工业生物技术的研发, 显著拓展了海洋生物资源的开发利用潜力[67,68].

在海洋化石与矿产能源勘探方面，全球海洋原油年产量约13亿吨，海洋天然气产量约1.2万亿立方米，约占30%~40%的年油气开采量，并保持年均2.7%的增长势头[69]. 这背后依赖于海洋地质与地球物理学以及无人潜水器(ROV/AUV)技术的跨越式发展. 板块构造与沉积盆地演化理论为深水油气盆地的精准定位提供了科学依据[70]，而高分辨率地震成像与深水钻探技术的融合应用，则显著提升了深海油气资源开发的可达性与安全性，推动勘探开发由陆架向深水与超深水持续拓展[71]. 据估计，深海多金属结核及富钴结壳中富含锰、镍和钴等新能源必需的关键金属，其资源量分别可达陆地储量的数倍至数百倍[72,73]；海水中锂资源总量亦远高于陆地. 虽然受限于开采技术、经济成本及环境约束，上述资源尚未进入商业化开发阶段，但海洋科学前沿正围绕深海采矿系统、环境影响评估与修复机制开展研究，将逐步构建高效、绿色、低扰动开发所需的关键工程技术体系与环境基准认知[74,75].

面向低碳科技前沿与碳中和，海洋科学同样发挥了核心引领作用. 目前全球海上风电装机容量已达约70 GW[76]，约供给了全球7000万户的家庭用电. 这一进展依赖于海洋气象观测与高分辨率数值预报、海气耦合过程模拟以及海洋工程流体力学等多学科的协同发展. 同时，潮汐能、波浪能及海洋温差能等新型海洋能源虽仍处于示范阶段，但其资源评估、能量转换机制及装置优化设计，均建立在对海洋动力过程与多尺度相互作用的深入认识之上，具备巨大的推动能源替代与转型潜力. 此外，海洋学家量化了红树林、海草床和大型藻类等海岸带生态系统的固碳能力，正式确立了“蓝碳(blue carbon)”的科学框架. 通过科学核算，海洋生态系统的碳汇功能被成功转化为可交易的碳信用额度和应对全球气候变化的战略级“新资源”，为全球碳中和目标的实现提供了

基于自然的海洋解决方案[77,78]. 综上所述, 海洋科学为人类利用开发海洋资源, 摆脱陆地资源能源枯竭的窘境, 支撑全球可持续发展提供重要科学基础与技术路径.

3.4 海洋科学技术助力了大国崛起、推动了人类历史发展

海洋是全球化的初始物质条件和重要载体, 90%的货物经海洋运往世界各地, 各大洲之间网络信息90%以上通过海底光缆传输[79]. 1950年到2000年, 海上运输使粮食运价下降70%, 煤炭运价下降80%, 成为大宗物品流转的主要方式, 塑造了全球工业布局, 形成了地球的经济命脉[80]. 海洋强国的崛起历程表明, 科技的研发与应用深刻改变了人类征服和利用海洋的方式, 也直接影响了海洋强国的更替.

自大航海时代以来的500多年, 从葡萄牙、西班牙、荷兰到英国, 海洋霸权的交替塑造了世界格局, 直至二战后美国确立了全球海洋霸主地位. 19世纪末, 美国采纳马汉海权论并将其作为海军建军的指导思想. 同一时期美国人Holland于1878年首次发明现代潜艇, 并于1900年正式列装美国海军, 引领了美国海军的崛起(1898~1914). 20世纪40年代, Scripps海洋研究所的Sverdrup与Munk在水声学、海浪、海流和潮汐预报方面取得了显著突破, 帮助盟军成功实施诺曼底和北非登陆, 从而扭转了战局, 为二战胜利作出了巨大贡献[81]. 同一时期, Woods Hole海洋研究所的Iselin、Ewing与Worzel等人发现了水下声道和影区, 并揭示了其对潜艇技术的军事价值, 进一步巩固了美国海军在全球的技术优势. 美国凭借此优势成功打击了长期潜伏在大西洋及美国东海岸的纳粹潜艇, 为解除纳粹对美国的海上封锁与禁运、维持其战时国内经济社会稳定作出了突出贡献[82].

冷战时期, 美国通过在海洋气象和遥感卫星、全球海底声呐监听网络、深海潜器、海洋环流数值模式等领域的技术突破, 成功巩固了深空与深海领域的领导地位. 冷战结束后, 美国在海洋科技与经济领域的进一步发展, 使得美国凭借其海洋强国的地位, 强势介入全球海洋事务, 美国海军成为其海上霸权地位的象征. 美国在20世纪的经验充分昭示了海洋科学在塑造其国际领导力方面的支柱性作用; 凭借这一先发优势, 美国正在并将持续借助海洋科学, 推动其拓展深海与极地等新疆域的进程.

然而, 持续的海洋霸权争斗并不应成为人类文明有序演进的主旋律. 习近平总书记指出“我们人类居住的这个蓝色星球, 不是被海洋分割成了各个孤岛, 而是被海洋连结成了命运共同体, 各国人民安危与共”. 海洋的通道作用使全球性的海洋治理成为可能. 在知识加速积累与迭代的今天, 系统化、导向化和全球化的新时代海洋科学有望为妥善解决由资源争夺引发的涉海分歧提供重要指引, 为应对海洋环境污染, 推动蓝色经济发展, 增进海洋福祉提供中国智慧和中国方案.

4 推动海洋科学贡献人类文明的中国力量

面向深海这一地球表层圈层中认知最为匮乏的领域, 我国已成为国际上唯一同时具备6000米级与万米级载人深潜能力并实现常态化应用的国家, 成为人类深海进入和开发的重要依靠力量; 在全球海洋观探测体系中, 我国已成为Deep Argo观测计划的第二大贡献国[83], 并通过建设西太平洋深海实时科学观测网和“梦想”号大洋钻探船等大国重器, 有效弥补了国际上传统TRITON阵列、“决心”号钻探船退役后的观探测空白. 围绕热液、冷泉和海山等极端环境的原位探测与实验研究, 我国科学家不断拓展对深海生命与能量获取机制的认识: 在海沟最深处发现了迄今已知最深的繁盛化能合成生命系统[18], 不仅系统深化了化能合成生态系统的结构与功能认知, 还发现部分微生物可利用微弱光信号(如红外光)参与代谢过程, 推动“深海仅依赖化能”的传统认识向多能量驱动框架转变[84]; 进一步地, 对“暗氧”产生机制的揭示, 则表明深海可能存在独立于光合作用的氧生成路径[85], 从而为“大氧化事件”之外地球可宜居性环境的形成提供了新的认识视角. 这些进展从能量来源、生命极限到生物地球化学过程多个层面, 重塑了对深海生态系统及地球系统演化的理解, 并为深海资源开发与环境保护提供了关键科学支撑.

在极地探索与研究方面, 我国同样形成了具有国际影响力的系统性布局. 作为非极区国家中极地考察站体系最为完善的国家之一, 我国已构建起涵盖南极沿岸站、内陆站以及北极关键区域的综合观测网络, 并以“雪龙”号、“雪龙2”号为支撑形成常态化极区科考能力. 在此基础上, 一系列原创性成果不断取得: 基于长期观测资料, 揭示了近几十年来北极海洋快速酸化的演变特征及其驱动机制[86]; 在北冰洋加克洋中脊研究中, 发现超慢速扩张体系中岩浆增生具有显著的时空不均一性, 深化了对洋壳形成与地幔过程耦合机制的认识[87]; 通过破译南极磷虾超大基因组(迄今最大动物基因组之一), 揭示了极地生物对极端环境的适应策略及其群体演化机制[88]. 这些成果从物理环境变化、固体地球过程到生命演化层面, 系统加强了对极地在地球系统中的关键作用的认识, 助力我国在极地科学话语权的提升.

在海洋全球变化应对与治理层面, 我国在理论创新、方法融合与大科学计划实施方面均取得实质性进展. 我国科学家提出“海洋微型碳泵”理论[89], 并发展基于多年代水文资料的全球生物碳泵反演方法, 揭示了平流与扩散过程在海洋碳汇中的重要作用, 为碳收支评估提供了关键约束[90], 并提出了海洋化学增汇的新途径[91]; 同时, 人工智能与海洋科学的深度融合正在重塑研究与预测范式, 我国已发展出“问海”“琅琊”“神针”等海洋预测大模型[92~94], 在多尺度海洋过程快速预报与灾害预警中展现出显著优势. 另一方面, 我国积极牵头联合国“海洋十年”框架下的大科学计划(如海洋负排放ONCE、海洋与气候无缝预报系统OSF计划等), 推动全球海

洋观测、预测与服务能力的协同发展, 并在支持小岛屿国家应对气候变化、提升海洋灾害防御能力等方面取得实际进展[95]. 总体而言, 我国海洋科学正由过程认知向“认知—预测—治理”一体化方向拓展, 在服务全球可持续发展中发挥着日益重要的作用.

5 新时代海洋科学的担当

随着全球人口的增长和资源需求的增加, 海洋正逐渐成为未来高质量发展的关键领域. 同时, 海洋的保护与可持续利用也面临着前所未有的挑战. 如何让海洋成为人类未来的蓝色家园, 是当今世界亟待解决的重要课题.

5.1 把脉海洋系统演化, 拓展海洋科学外延

未来应推动海洋科学与其他基础科学和工程科学的融合, 不断迭代海洋观探测技术, 促使人类能够深入深海、凿穿深地, 实现对海洋多圈层过程的连续观测与精细刻画, 逐步揭示海洋系统动力与生命过程、物质循环与能量交换的关键机制与动态规律; 借助高分辨率模拟和人工智能等新兴技术, 洞悉地球系统长期演化的规律, 突破传统认知的边界. 同时, 以深空探索为契机, 推动海洋科学与行星科学的结合, 为寻找宜居星球提供关键指引, 从更广阔的视角审视地球系统与生命现象.

5.2 提升海洋科技创新能力, 推动海洋高质量发展

面对复杂多变的国际环境和目前文明交流出现逆风逆流的背景, 海洋首先是国家的战略新疆域和新屏障. 正所谓“海兴则国强民富, 海衰则国弱民穷”, 海洋科技创新正是推动国家战略的核心动力之一. 未来应加快建设海洋感知与环境保障能力, 大力发展海洋探测技术、海洋开发技术、海洋装备制造技术, 促进重大原创理论突破; 提高海洋资源开发能力, 开发利用生物、化学、矿产等资源以及潮汐能、波浪能、风能等可再生能源; 促进海洋生态环境保护, 巩固大陆架、岛礁、深海、极地等重要战略支点, 通过提升海洋产业集群的能级, 强化国民经济的韧性, 使海洋可以成为保障国家领土安全、资源能源安全、环境安全的支柱领域, 最终促使我国以海洋强国的新姿态守护好自身的蓝色疆土.

5.3 培育深厚的海洋科学文化和崇尚科学的海洋文化

海洋科学的发展离不开深厚的海洋文化. 《中庸》所言“尊德性而道问学, 致广大而尽精微, 极高明而道中庸”, 为海洋科学文化的构建提供了具有方法论意义的启示. 首先海洋学界应树立求真、审慎的正确科学价值导向, 进而从更加旷阔的时空、学科视野下的形成对海洋宏观与微观变化的系统性认识, 同时, 即便在认知不断逼近“极高明”的阶段, 仍需在科学实践中要对海洋心存敬畏, 秉持审慎、协调而不偏激之道. 进一步地, 应在全社会层面培育接纳科学、尊重规律的海洋文化, 以科学立场“关心海洋”, 从而为海洋科学充分发挥效用并持续推动人类文明进步提供活跃土壤与理性氛围.

5.4 和谐自然, 构建人类海洋命运共同体

海洋是大自然给予人类的赐福, 是沿海国家的天赋资源, 也是全人类共同的财富, 而不应成为霸权的地盘和欲望践踏的对象. 然而, 在全球变化和逆全球化背景下, 海洋系统的不确定性日益加剧, 海洋环境灾害的发生频率与强度日益增强, 海洋权益争夺日益激烈. 面对全球变暖、极地变化、海洋资源开发等全人类关注的问题, 海洋科学应积极提出基于海洋的系统性解决方案, 以增进人类福祉, 推动海洋全球治理, 努力避免陆地文明阶段的历史失误和教训在海洋发展中重演.

作为地球生命的摇篮, 海洋不仅是人类文明的起点, 也是未来发展的希望. 而海洋科学, 更应该成为人海和谐发展和海洋命运共同体建设的纽带、执杖与明灯, 在人类文明进步中作出更大的贡献. 从“认识海洋”到“经略海洋”, 在海洋开发与治理之间找到平衡, 是新时代海洋科学的责任和使命.

致谢 感谢国家自然科学基金海洋科学学科体系布局战略研究(42342064)、“十五五”海洋科学学科发展战略研究(42542008)资助. 衷心感谢戴民汉院士、李家彪院士、张偲院士在项目执行和本文撰写过程中的全程指导. 衷心感谢冷疏影研究员和参与海洋学科体系梳理和“十五五”海洋科学学科发展战略研究的专家为本文提供的重要指导.

推荐阅读文献

1 Weller R A, Baker D J, Glackin M M, et al. The challenge of sustaining ocean observations. Front Mar Sci, 2019, 6: 105
2 Le Heron D P, Cox G, Trundley A, et al. Sea ice-free conditions during the Sturtian glaciation (early Cryogenian), South Australia. Geology, 2011, 39: 31–34
3 Song H, An Z, Ye Q, et al. Mid-latitudinal habitable environment for marine eukaryotes during the waning stage of the Marinoan snowball glaciation. Nat Commun, 2023, 14: 1564

4 Day J W, Hall C A, Klitgaard K, et al. The coming perfect storm: diminishing sustainability of coastal human-natural systems in the Anthropocene. Camb Prisms Coast Futur, 2023, 1: E35
5 Sekovski I, Newton A, Dennison W C. Megacities in the coastal zone: using a driver-pressure-state-impact-response framework to address complex environmental problems. Estuar Coast Shelf Sci, 2012, 96: 48–59
6 OECD. Measuring the global economic contribution of ocean-based industries. In: The Ocean Economy in 2030, 2016. Paris: OECD Publishing
7 National Marine Data and Information Service. 2024 China Ocean Development Index Report (in Chinese). 2024 [国家海洋信息中心. 2024中国海洋发展指数报告. 2024]
8 Yao P. World Marine Economic Competition Intensifies (in Chinese). In: Huang Y H, Jin H, eds. European and American History Studies (Vol. 2). Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018. 132–135 [姚朋. 世界海洋经济竞争越演越烈. 见: 黄艳红, 金海, 编. 欧美史研究(第2辑). 北京: 社会科学文献出版社. 2018. 132–135]
9 IPCC. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022
10 Needham J. Science and Civilisation in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1975 [李约瑟. 中国科学技术史. 北京: 科学出版社, 1975]
11 Murphy R C, Sverdrup H U, Johnson M W, et al. The oceans: their physics, chemistry, and general biology. Geographical Rev, 1944, 34: 170
12 Rosenfeld L. Discovery and early uses of iodine. J Chem Educ, 2000, 77: 984
13 Feng S Z, Li F Q, Li S J. Introduction to Marine Science (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1999 [冯士筰, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999]
14 Vine F J, Matthews D H. Magnetic anomalies over oceanic ridges. Nature, 1963, 199: 947–949
15 Chelton D B, Schlax M G. Global observations of oceanic Rossby waves. Science, 1996, 272: 234–238
16 Broeker W. The great ocean conveyor. Oceanography, 1991, 4: 79–89
17 Lonsdale P. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers. Deep Sea Res, 1977, 24: 857–863
18 Peng X, Du M, Gebruk A, et al. Flourishing chemosynthetic life at the greatest depths of hadal trenches. Nature, 2025, 645: 679–685
19 Li L, Zhang H, Xi S, et al. Large hydrogen hydrothermal pipe swarm identified in the deep ocean. Sci Bull, 2025, 70: 2583–2586
20 Wu L, Chen Z, Lin X, et al. Building the integrated observational network of “Transparent Ocean” (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2654–2661 [吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. “透明海洋”立体观测网构建. 科学通报, 2020, 65: 2654–2661]
21 Wang Q Y. History of Aquaculture in China (in Chinese). In: Encyclopedia of China. 3rd ed. Agriculture. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2021 [王清印. 中国水产养殖史. 见: 中国大百科全书(第三版). 农学. 北京: 中国大百科全书出版社, 2021]
22 van Zanden B J. Maddison Project Database (MPD) version 2023, 2024
23 Aylor W K. Business performance and value of exploitation 3-D seismic. Leading Edge, 1995, 14: 797–801
24 Gentry R R, Rassweiler A, Ruff E O, et al. Global pathways of innovation and spread of marine aquaculture species. One Earth, 2023, 6: 20–30
25 Yang Z Y, Zhang D. The high-quality development of Chinese fisheries from the perspective of the all-encompassing approach to food: current situation, problems and improvement strategies (in Chinese). Chin Fish Econom, 2023, 41: 1–13 [杨正勇, 张迪. 大食物观视角下中国渔业高质量发展——现状、问题及提升对策. 中国渔业经济, 2023, 41: 1–13]
26 Yang H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects (in Chinese). J Fish China, 2016, 40: 1133–1140 [杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望. 水产学报, 2016, 40: 1133–1140]
27 Yu Y Y. Research on the development strategies of Qingdao’s deep-sea aquaculture industry (in Chinese). China Fish, 2026, 53: 65–67 [于洋洋. 青岛深远海养殖产业发展对策研究. 中国水产, 2026, 53: 65–67]
28 Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. The rise of oxygen in Earth’s early ocean and atmosphere. Nature, 2014, 506: 307–315
29 Tajika E, Harada M. Great Oxidation Event and Snowball Earth. In: Yamagishi A, Kakegawa T, Usui T, eds. Astrobiology: From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence. Singapore: Springer Singapore, 2019. 261–271
30 Hess H H. History of Ocean Basins. Petrologic Studies. New York: Geological Society of America, 1962
31 McKenzie D P, Parker R L. The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. Nature, 1967, 216: 1276–1280
32 Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. J Geophys Res, 1968, 73: 1959–1982
33 Cai C, Wiens D A, Shen W, et al. Water input into the Mariana subduction zone estimated from ocean-bottom seismic data. Nature, 2018, 563: 389–392
34 Stern R J. Subduction zones. Rev Geophys, 2002, 40: 3-1-3-38
35 French S W, Romanowicz B. Broad plumes rooted at the base of the Earth’s mantle beneath major hotspots. Nature, 2015, 525: 95–99
36 Korenaga J. Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: theories and observations. Annu Rev Earth Planet Sci, 2013, 41: 117–151
37 Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the galápagos rift. Science, 1979, 203: 1073–1083
38 Martin W, Baross J, Kelley D, et al. Hydrothermal vents and the origin of life. Nat Rev Microbiol, 2008, 6: 805–814

39 Inagaki F, Hinrichs K U, Kubo Y, et al. Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. Science, 2015, 349: 420–424

40 Morono Y, Ito M, Hoshino T, et al. Aerobic microbial life persists in oxic marine sediment as old as 101.5 million years. Nat Commun, 2020, 11: 3626

41 Waite J H, Glein C R, Perryman R S, et al. Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: evidence for hydrothermal processes. Science, 2017, 356: 155–159

42 Stommel H. The abyssal circulation. Deep Sea Res (1953), 1958, 5: 80–82

43 Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. Tellus, 1961, 13: 224–230

44 Broecker W S, Peng T H. Tracers in the Sea. Palisades, New York: Eldigio Press, Lamont-Doherty Geological Observatory, 1982

45 Broecker W S. The biggest chill. Natural History Magazine, 1987, 97: 74–82

46 Broecker W S. Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming? Science, 1975, 189: 460–463

47 Volk T, Hoffert M I. Ocean carbon pumps: analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO_2 changes. In: Sundquist E T, Broecker W S, eds. The Carbon Cycle and Atmospheric CO_2: Natural Variations Archean to Present. Washington DC: American Geophysical Union, 1985. 99–110

48 Martin J H. Glacial-interglacial CO_2 change: the iron hypothesis. Paleoceanography, 1990, 5: 1–13

49 Jackson L C, Biastoch A, Buckley M W, et al. The evolution of the North Atlantic meridional overturning circulation since 1980. Nat Rev Earth Environ, 2022, 3: 241–254

50 Portmann V, Swingedouw D, Khattab O, et al. Observational constraints project a ~50% AMOC weakening by the end of this century. Sci Adv, 2026, 12: eadx4298

51 Wu Z J. A preliminary classification study of ancient marine flood disasters in China (in Chinese). Master Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006 [吴芷菁. 中国古代海溢灾害的初步分类研究. 硕士学位论文. 郑州: 郑州大学, 2006]

52 Mori N, Satake K, Cox D, et al. Giant tsunami monitoring, early warning and hazard assessment. Nat Rev Earth Environ, 2022, 3: 557–572

53 Fujinawa Y, Noda Y. Japan's earthquake early warning system on 11 March 2011: performance, shortcomings, and changes. Earthquake Spectra, 2013, 29: 341–368

54 Cane M A, Zebiak S E. Prediction of El Niño events using a physical model. In: Cattle H, ed. Atmospheric and Oceanic Variability. Bracknell: Royal Meteorological Society Press, 1987. 153–182

55 Ham Y G, Kim J H, Luo J J. Deep learning for multi-year ENSO forecasts. Nature, 2019, 573: 568–572

56 Liu Y, Cai W, Lin X, et al. Nonlinear El Niño impacts on the global economy under climate change. Nat Commun, 2023, 14: 5887

57 Carter L. Submarine cables and the oceans: connecting the world. UNEP World Conservation Monitoring Centre, 2009

58 Talling P J, Cartigny M J B, Pope E, et al. Detailed monitoring reveals the nature of submarine turbidity currents. Nat Rev Earth Environ, 2023, 4: 642–658

59 Kunath P, Talling P J, Urlaub M, et al. Ocean-bottom seismometers document how submarine landslides develop and grow. Commun Earth Environ, 2025, 6: 871

60 Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science, 2008, 321: 926–929

61 Anderson C R, Berdalet E, Kudela R M, et al. Scaling up from regional case studies to a global harmful algal bloom observing system. Front Mar Sci, 2019, 6: 250

62 Yu Z, Song X, Cao X, et al. Mitigation and control of harmful algal blooms. In: Glibert P, Berdalet E, Burford M, et al., eds. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018

63 Buck B H, Troell M F, Krause G, et al. State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). Front Mar Sci, 2018, 5: 165

64 FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in Action. 2024

65 Costello C, Cao L, Gelcich S, et al. The future of food from the sea. Nature, 2020, 588: 95–100

66 Arrieta J M, Arnaud-Haond S, Duarte C M. What lies underneath: conserving the oceans' genetic resources. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 18318–18324

67 Chen J, Jia Y, Sun Y, et al. Global marine microbial diversity and its potential in bioprospecting. Nature, 2024, 633: 371–379

68 Zhivkoplias E, Jouffray J B, Dunshirn P, et al. Growing prominence of deep-sea life in marine bioprospecting. Nat Sustain, 2024, 7: 1027–1037

69 CNPC Economics & Technology Research Institute. Domestic and International Oil and Gas Industry Development Report 2023 (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2023 [中国石油经济技术研究院. 2023年国内外油气行业发展报告. 北京: 石油工业出版社, 2023]

70 Mann P, Gahagan L, Gordon M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields. In: Halbouty Michel T, ed. Giant Oil and Gas Fields of the Decade, 1990–1999. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 2003

71 Zhang G, Qu H, Chen G, et al. Giant discoveries of oil and gas fields in global deepwaters in the past 40 years and the prospect of exploration. J

Nat Gas Geosci, 2019, 4: 1–28
72 Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources. Ore Geol Rev, 2013, 51: 1–14
73 Petersen S, Krätschell A, Augustin N, et al. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. Mar Policy, 2016, 70: 175–187
74 Guo X, Fan N, Liu Y, et al. Deep seabed mining: frontiers in engineering geology and environment. Int J Coal Sci Technol, 2023, 10: 23
75 Stewart E C D, Wiklund H, Neal L, et al. Impacts of an industrial deep-sea mining trial on macrofaunal biodiversity. Nat Ecol Evol, 2025, 10: 318–329
76 McCoy A, Musial W, Hammond R, et al. Offshore Wind Market Report: 2024 Edition. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), 2024
77 Macreadie P I, Anton A, Raven J A, et al. The future of blue carbon science. Nat Commun, 2019, 10: 3998
78 Macreadie P I, Biddulph G E, Masque P, et al. Priority questions for the next decade of blue carbon science. Nat Ecol Evol, 2026, 10: 751–764
79 Clark B. Undersea cables and the future of submarine competition. Bull Atomic Scientists, 2016, 72: 234–237
80 Hummels D. Transportation costs and international trade in the second era of globalization. J Econ Perspect, 2007, 21: 131–154
81 Chen Z H, Wu L X, Jing Z. Seventy years of exploration in oceanography—Achievement interpretation of 2010 Crafoord prize winner professor Walter H Munk (in Chinese). Sci Sin Terrae, 2016, 46: 1555–1563 [陈朝晖, 吴立新, 荆钊. 探知海洋七十载——2010年Crafoord奖获得者Walter H Munk教授成就解读. 中国科学: 地球科学, 2016, 46: 1555–1563]
82 Lasky M. Review of undersea acoustics to 1950. J Acoust Soc Am, 1977, 61: 283–297
83 Chen Z H, Ren C, Liu Z H, et al. Successful first batch deployment of the “Deep-Sea Xuanwu” floats in China’s Deep Argo regional observing network (in Chinese). J Mar Sci, 2024, 42: 117–118 [陈朝晖, 任翀, 刘增宏, 等. 我国深海Argo区域观测网成功完成“深海玄武”浮标首次批量布放. 海洋学研究, 2024, 42: 117–118]
84 Liu G, Shan Y, Zheng R, et al. Growth promotion of a deep-sea bacterium by sensing infrared light through a bacteriophytochrome photoreceptor. Environ Microbiol, 2021, 23: 4466–4477
85 Zheng R, Wang C, Wang H, et al. Nitrate-driven dark oxygen production by diverse deep-sea microorganisms. bioRxiv, 2025, doi: 10.1101/2025.03.10.642362
86 Qi D, Ouyang Z, Chen L, et al. Climate change drives rapid decadal acidification in the Arctic Ocean from 1994 to 2020. Science, 2022, 377: 1544–1550
87 Zhang T, Li J, Niu X, et al. Highly variable magmatic accretion at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge. Nature, 2024, 633: 109–113
88 Shao C, Sun S, Liu K, et al. The enormous repetitive Antarctic krill genome reveals environmental adaptations and population insights. Cell, 2023, 186: 1279–1294.e19
89 Jiao N, Luo T, Chen Q, et al. The microbial carbon pump and climate change. Nat Rev Microbiol, 2024, 22: 408–419
90 Wang W L, Fu W, Le Moigne F A C, et al. Biological carbon pump estimate based on multidecadal hydrographic data. Nature, 2023, 624: 579–585
91 Liu S S, Song J M, Li X G, et al. Enhancing CO_2 storage and marine carbon sink based on seawater mineral carbonation. Mar Pollution Bull, 2024, 206: 116685
92 Cui Y, Wu R, Zhang X, et al. Forecasting the eddying ocean with a deep neural network. Nat Commun, 2025, 16: 2268
93 Yang N, Wang C, Zhao M, et al. LangYa: revolutionizing cross-spatiotemporal ocean forecasting. arXiv, 2024, arXiv.2412.18097
94 Zhao W, Lin X, Jin Y, et al. South China Sea “神针(Trident)”: solution for ocean forecast foundation models. Innovation, 2026, 7: 101364
95 Wang Y T, Mao Y Y, Wang Z, et al. The United Nations “Ocean Decade”: advancing a shared future for the ocean through global scientific collaboration (in Chinese). J Mar Sci, 2026, 44: 48–65 [王云涛, 毛洋洋, 王峥, 等. 联合国“海洋十年”——以全球科技合力共筑海洋命运共同体. 海洋学研究, 2026, 44: 48–65]

Summary for “海洋科学对人类文明的贡献”

The contribution of marine science to human civilization

Zhaohui Chen[1], Jia-Zhen Wang[2], Zhuo Chen[3], Zhiteng Yu[4], Zhimian Cao[5], Xin Liu[6], Liang Zhang[7] & Lixin Wu[1,2*]

[1] *Physical Oceanography Laboratory, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*
[2] *Laoshan National Laboratory, Qingdao 266237, China*
[3] *United Front Work Department of The CPC Committee, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*
[4] *State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*
[5] *College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China*
[6] *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China*
[7] *Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China*
* Corresponding author, E-mail: lxwu@ouc.edu.cn

This paper examines the co-evolution of human civilization and the ocean, and argues that the advancement of marine science has been both a prerequisite for and a consequence of humanity’s expanding interaction with the ocean. It synthesizes historical trajectories, scientific breakthroughs, and contemporary challenges to position marine science as a central pillar in addressing global sustainability and governance.

From a historical perspective, human understanding of the ocean has evolved from fragmented, experience-based observations to a systematic, multi-dimensional scientific framework. Early knowledge, constrained by limited observational capacity, was largely localized and descriptive. The expansion of navigation and exploration during the Age of Discovery enabled the accumulation of global-scale observations, fostering foundational insights into ocean circulation, tides, and biogeochemical properties. The establishment of modern marine science in the late nineteenth century, marked by large-scale expeditions and interdisciplinary integration, transformed the ocean from a navigational medium into a primary object of scientific inquiry. Subsequent technological advances, including satellite remote sensing, autonomous observing systems, and deep-sea exploration, have enabled the transition from two-dimensional and quasi-static representations toward a four-dimensional understanding of ocean variability across space and time.

The paper further emphasizes that marine science has fundamentally reshaped humanity’s capacity to utilize and manage ocean resources. Historically, ocean exploitation progressed from basic fisheries and maritime transport to technologically sophisticated sectors such as offshore energy, aquaculture, and deep-sea resource exploration. Scientific advancements have significantly improved the efficiency, scale, and safety of these activities. At the same time, insufficient understanding of ocean processes has led to severe environmental and engineering disasters, underscoring the necessity of science-based governance. In the contemporary context, marine science supports the development of sustainable “blue economies”, encompassing food security, renewable energy, and emerging biotechnologies, while also enabling the quantification and management of ecosystem services such as carbon sequestration.

As a crucial driver of civilizational advancement, modern marine science has fundamentally answered core scientific inquiries regarding Earth’s habitability and the evolution of life. Theoretical breakthroughs, such as plate tectonics and the discovery of chemosynthetic ecosystems at deep-sea hydrothermal vents, have completely reshaped scientific understanding of biological origins, global climate mechanisms, and the Earth’s internal dynamics. Furthermore, marine science has significantly enhanced humanity’s resilience against natural catastrophes through the development of sophisticated early warning systems for tsunamis, El Niño-Southern Oscillation events, and ecological disasters like harmful algal blooms and hypoxia. Beyond disaster mitigation, the discipline underpins the sustainable exploitation of marine resources. It drives the “blue agricultural revolution” to ensure global food security, facilitates the precise and safe extraction of deep-water hydrocarbons and critical deep-sea minerals, and pioneers the utilization of renewable marine energy and “blue carbon” sinks. These innovations offer vital technological pathways to combat terrestrial resource depletion and global climate change.

Despite these advancements, the prolonged and intensifying scale of anthropogenic activities since the Industrial Revolution has precipitated severe marine environmental crises, including ocean warming, acidification, and severe pollution. Historically, mastery over the ocean and advancements in marine science and technology have dictated the rise and fall of global superpowers, often leading to hegemonic geopolitical competition. However, in the contemporary era, the paradigm of maritime strategy must transition from unchecked extraction and zero-sum rivalry to sustainable stewardship and cooperative governance.

In the new era, marine science should establish a new paradigm rooted in marine system science, providing profound insights into the ocean’s pivotal role in Earth’s habitability. It should serve as a cornerstone for building a strong maritime nation, fortifying strategic barriers for territorial, resource, and environmental security. Furthermore, marine science should act as a guiding beacon for sustainable development, fostering global governance and enhancing the well-being of all humanity.

marine science, human civilization, strong maritime nation, understanding the ocean, managing the ocean, sustainable development

doi: 10.1360/CSB-2026-0411