

总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”^①，明确要求到2035年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向2035年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

^① 习近平：高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告。北京：人民出版社，2022：33。

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”^①

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

^① 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”系列成果以“中国学科及前沿领域 2035 发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王恩哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学科及前

总 序

沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”

联合领导小组

2023年3月

前 言

海洋是生命的摇篮、资源的宝库和国家安全的屏障，是未来人类可持续发展的重要战略空间。广袤深邃的海洋只有 5% 的区域已被人类探索，加快海洋科技创新、提高海洋资源开发能力、保护海洋生态环境是我国海洋科学发展的战略使命，是实现“关心海洋、认识海洋、经略海洋”的根本，事关国家发展的命脉。当前，我国海洋科学研究正在逐步从跟跑阶段进入并跑阶段，海洋科学的发展正面临前所未有的重要机遇。在这一背景下，中国科学院和国家自然科学基金委员会联合发起了学科战略研究，海洋科学发展战略研究旨在分析当前海洋科学发展态势和国家重大战略需求的基础上，展望 2035 年前海洋科学的发展方向 and 关键领域。

本研究由国家自然科学基金委员会与中国科学院学部学科发展战略研究项目资助，于 2020 年 1 月正式启动，随即成立了由海洋及相关领域的院士和国家自然科学基金委员会地球科学部管理专家组成的专家组，以及由海洋领域优秀中青年科学家组成的编写组和优秀青年学者组成的工作组，团队统筹分工、密切合作，实现战略研究工作的稳步推进。项目执行的两年期间，为克服新冠疫情影响，采取“线上+线下”相结合方式，先后举办了项目启动会、专家组会议、项目全体会议，以及各章节编写组内部交流会、学术秘书工作进展交流会等一系列战略研讨会议，并广泛征求相关意见和建议，最终形成本书。

本书全面总结当前海洋科学日益凸显的学科战略地位（第一章）；深入剖析其发展规律、现状和态势，重点梳理我国海洋科学的优势学科、薄弱学科、交叉学科的发展状况，探讨推动我国海洋科学发展的关键举措（第二章和第三章）。在此基础上，通过凝练制约我国海洋科学发展的关键科学领域，提出我国海洋科学发展的总体思路、目标和重要研究方向（第四章），提出 2035 年前我国海洋科学发展的总体思路——面向世界科技前沿，解决重大基础科学问题；服务国家战略需求，保障国家权益和人民生命健康；建设大科学装置、设立大科学工程，增强海洋智能感知和预测能力；牵头国际大科学计划，引领国际海洋科学发展。未来，我国应当进一步完善顶层设计和科学规划，围绕海洋能量传递与物质循环，跨圈层流固耦合与板块运动，海洋生命过程及其适应演化机制，极地系统快速变化的机制、影响和可预测性，健康海洋与海岸带可持续发展，海洋智能感知与预测系统六大重点研究方向开展协同攻关，立足国家战略需求和学科发展前沿，加快发起由中国主导的国际大科学计划，抢占国际海洋研究的制高点。此外，本书通过对比分析国内外海洋科学科研资助的现状，指出我国海洋科学研究资助布局存在的主要问题，并建议“十四五”期间海洋科学领域应从体制机制创新、资源配置方式和组织管理模式等方面实行进一步优化，加快提升我国海洋科技整体水平和国际竞争力（第五章）。

本书是在专家组的全面指导下，全体工作组和编写组成员辛勤付出和共同努力的结果。在此，向他们表示崇高的敬意和衷心的感谢！希望本书能为国家海洋科技及相关领域的中长期规划提供参考，服务于中国海洋科技的高质量跨越式发展。

由于本书涵盖面较广，难免存在薄弱环节与疏漏之处，敬请读者批评指正和谅解。

吴立新

《中国海洋科学 2035 发展战略》专家组组长
2022 年 2 月

摘 要

海洋是生命的摇篮，是全球气候系统的调节器，是人类可持续发展的战略空间，是地球系统科学发展的重要引擎。海洋对地球系统的热量循环、水循环、物质循环等有重要的调控作用，认识海洋物质能量循环过程是理解和应对极端天气和气候变化的根本，是提升我国在应对气候变化、全球海洋治理、科学部署地球工程、维系地球宜居性等问题上国际话语权的关键。海洋孕育了地球上最大的生态系统，具有巨大的服务功能和价值，认识蓝色生命系统过程与规律、合理开发和保护蓝色生物资源是支撑人类社会可持续发展的重大战略需求。海洋是地球上最大的生存空间，同时也是国家天然的战略屏障、运输命脉，提升海洋环境的智能感知与预测能力，对保障我国能源资源安全、拓展深远海战略空间至关重要。然而到目前为止，占地球表面积 2/3 的海洋只有 5% 的区域已被人类探索。未知的海洋孕育着无尽的想象与创造力，是重大科学发现和颠覆性技术创新的源泉和摇篮。

党的十八大报告首次提出建设“海洋强国”这一重大战略部署，党的十九大报告强调“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国”。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》也明确提出协同推进海洋生态保护、海洋经济发展和海洋权益维护。2018 年 6 月，习近平总书记在考察青岛海洋科学与技术

试点国家实验室时强调：建设海洋强国，必须进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋，加快海洋科技创新步伐。开发海洋资源、发展海洋经济将成为区域经济社会可持续发展的必然选择，推动海洋科技成果向现实生产力转化进而支撑海洋新兴产业发展，可以全面提升海洋经济增长的质量和效益，有力推动经济发展方式的质量变革、效率变革和动力变革。因此，提高海洋资源开发能力、发展海洋经济、保护海洋生态环境、维护国家海洋权益是我国海洋科学发展的战略使命，是服务海洋强国建设、保障人类社会高质量可持续发展的必由之路。2019年4月，习近平总书记在青岛集体会见应邀出席中国人民解放军海军成立70周年多国海军活动的外方代表团团长时，首提构建“海洋命运共同体”，为应对全球海洋秩序变革提出了重要解决方案。海洋科学和技术的发展则是构建“海洋命运共同体”的重要理论支撑，是我国参与国际海洋事务的主要科学依据，是实现海洋强国战略和民族复兴的重要基础。

海洋科学是研究海洋的自然现象、性质及其变化规律，以及与综合开发利用海洋有关的知识体系。它的研究对象是占地球表面71%的海洋，包括海水、溶解和悬浮于海水中的物质、生活于海洋中的生物、海底沉积和海底岩石圈，以及海面上的大气边界层和河口海岸带等，也包括与海洋管理和海洋技术相关的交叉科学。海洋科学的发展经历了科技与工业革命前的萌芽时期、工业革命推动下的创建时期以及信息科技革命推动下的新时代，为人类认知地球和生命的起源与演变、利用与保护自然资源、认知全球变化和治理生态环境等做出了巨大贡献。海洋科学的创新发展体现在观测与分析手段的持续变革、基础科学理论的不断建立以及前沿研究领域的积极拓展中。海洋科学领域的重要突破也促进了众多学科关键问题的解决，开辟了新的研究领域，推动了生命科学、信息科学、材料科学、能源科学、空间科学、社会科学等其他学科领域的发展。进入

21 世纪，国际海洋科学研究已经进入一个崭新阶段，主要体现在两个发展方向、三大发展趋势。两个发展方向是指：海洋科学的研究对象已经从仅仅关注陆地周边的近岸、近海拓展到了包括深海大洋、极地的全海域范围；研究手段也从局地、间歇的考察扩展到了大区域、全天候的持续观测。与之相应，海洋科学的三大发展趋势体现在：从各单一学科的“单打独斗”转向强调多学科、跨尺度的系统性研究；从“科学受限于技术、技术单纯服务于科学”转向科学与技术紧密合作、协同发展；从科考平台的专用化、科研数据的孤岛性转向平台公用化和数据网络化。海洋科学正在整体进入转型期，学科已逐步提升到集成整合、探索机理的系统科学新高度，深化拓展近海研究与管理、聚焦深海与极地新疆域、开展多圈层多尺度耦合研究成为世界各国海洋研究的新趋势。

海洋科学具有鲜明的大科学特征，海洋问题的复杂性使其无法通过单一学科的研究得以解决，而是需要多学科领域间深度交叉与融合。近十年来，随着综合国力的提升、科技经费投入的增加、科研条件的改善和对外合作交流的加强，我国海洋科学表现出了强劲的发展势头。我国海洋领域科研成果的数量快速增长、影响力稳步提升，2019 年我国发表海洋科学论文数量已位居世界第一位、篇均被引用频次为世界第三位，切实体现了国家科技研发投入对科学研究的促进作用。研究领域从中国近海拓展到深海大洋与极地海域，研究问题正在逐步从单一学科的科学问题向多学科交叉问题过渡，海洋领域各学科均取得了一系列重要的研究成果：①物理海洋专业，主要体现在海洋环流理论、海洋中小尺度动力过程、大洋能量传递及其气候效应、海洋气候变率与气候变化等方面；②海洋化学专业，主要体现在近海生源要素循环过程、营养盐沉降过程、海洋生源活性气体、颗粒物中的生物标志物及其示踪应用、海洋酸化和海洋低氧等方面；③海洋生物专业，主要体现在生物泵和微型生物碳泵机

理、极端海洋环境中的生命、深海生态系统、生态系统与全球变化、生物多样性与生命演化、海洋渔业资源等方面；④海洋地质和地球物理专业，主要体现在南海构造和古地理演变历史、气候变化的低纬驱动假说、亚洲大陆边缘的“源-汇”过程等方面；⑤极地海洋科学专业，主要体现在南极冰盖冰川动力学、极地冰川与海洋的相互作用、极地海洋与全球变化等方面；⑥海洋观测探测技术，主要体现在海洋环境监测卫星系统组网、海底观测网系统、深海载人和无人潜水器等方面。然而，也要清晰认识到，当前我国海洋领域的研究水平相比其他海洋科技强国仍存在一定差距。基础研究方面，缺乏对奠基性理论的实质贡献，尚未在整体上形成引领学科前沿发展的态势；科研经费投入不持续，海洋模式开发、观测体系建设、灾害监测预警方面仍受到技术瓶颈的制约；科研队伍方面，缺乏跨学科的综合海洋研究人才；此外，缺少由中国发起或主导的国际大科学计划和大科学工程，国际话语权明显不足。未来，我国海洋科学的继续发展，需重视优势学科、补强薄弱环节、推进交叉学科的创新发展，以科学引领技术的进步，以技术推动科学的发展，力求攻克一系列具有深远现实意义和理论价值的重大科学问题与技术瓶颈。

通过梳理和总结目前国际海洋领域诸多悬而未决的重大前沿科学问题，得出当前推动海洋科学发展的关键科学领域主要体现在四个方面。①海洋与地球宜居性：随着温室气体、微塑料等污染物排放的增加，地球环境和生态系统正在人类活动的影响下迅速退化，地球的宜居性面临着前所未有的威胁；海洋因其巨大的热惯性，储存了整个气候系统中超过 90% 的热量盈余，吸收了自工业革命以来近 30% 的人类活动排放 CO_2 ，是地球系统中最大的活动碳库，是支撑地球宜居性的重要保障。②海洋与生命起源：海洋中保留着最完整的生物门类体系，深海、热液、潮间带等特殊生境中存在着丰富

多样的生命形式，隐藏着生命起源和演化的密码；生命进化史中许多重大事件都发生在海洋中，解码蓝色生命是破解地球生命奥秘至关重要的一环。③海洋可持续产出：世界能源资源勘探开发已进入海洋时代，未来能源资源将主要来源于深海；蓝色生命是“蓝色国土”的精华资源，蕴藏着不可估量的科学、经济和战略开发潜能；海岸带是人类生活的重要场所，是实现我国“一带一路”、长三角一体化发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设等的命脉。④海洋智能感知与预测：海洋信息的感知和获取是人类认识、经略海洋的基础，如何突破海洋观探测关键技术瓶颈、研发高新海洋装备及平台是推动海洋科学发展、建设海洋强国战略的重中之重。

综上，2035年前我国海洋科学发展总体思路应围绕以下四点展开。①面向世界科技前沿，解决重大基础科学问题。海洋科学的发展应当面向气候变化、生命起源、地球深部运转规律等核心科学问题，围绕海洋能量传递与物质循环，跨圈层流固耦合与板块运动，海洋生命过程及其适应演化机制，极地系统快速变化的机制、影响和可预测性，健康海洋与海岸带可持续发展，海洋智能感知与预测系统等基础前沿，加强顶层设计和战略布局，启动一批重大研究计划和重大项目，围绕重大基础理论开展协同攻关。②服务国家战略需求，保障国家权益和人民生命健康。未来，应当在海洋资源、能源开发利用的关键科学技术领域取得重要突破，为人类社会可持续发展提供物质基础；增强海洋、极地环境预报预警能力，为海上、冰上丝路航行及工程活动提供环境信息保障；深刻揭示海洋生态系统演变趋势和生态灾害发生机理，阐明海岸带生态-资源-环境-社会经济耦合运作趋势，为实现健康海洋提供科学指导；可持续开发海洋生物资源，为食品安全和人民生命健康提供重要科技支撑。③建设大科学装置、设立大科学工程，增强海洋智能感知和预测能力。着力推动海洋科技向创新引领型转变，突破“卡脖子”技术，

建立自主可控的新一代高精尖技术体系，布局基于物联网技术的太空-海气界面-深海-海底的多要素智能立体观测网，建设大洋钻探船、深海空间站等重大科学装置，构建基于人工智能和大数据的多圈层耦合的高分辨率海洋观测与模拟预测系统，支撑全球海域跨尺度、跨圈层的多学科交叉研究，增强海洋智能感知和预测能力，保障海上活动与工程安全，评估未来地球宜居性。④牵头国际大科学计划，引领国际海洋科学发展。海洋科学的复杂程度、经济成本、实施难度等往往都超出一国之力，需要凝聚全球资源和智力来实现突破，未来我们应围绕国家战略需求和学科前沿，立足“两洋一海”和极地等关键海区，凝练重大科学问题，加快发起由中国主导的国际大科学计划，通过聚集全球优势科技资源，统筹布局、协同攻关，显著提升我国在海洋科学研究领域的国际影响力，引领世界海洋科技创新和进步。

我们应抓住当前“联合国海洋科学促进可持续发展十年”（2021—2030年）的黄金契机，瞄准国际海洋研究领域的重大科学前沿，结合我国当前海洋科学研究现状和发展趋势，重点在海洋能量传递与物质循环，跨圈层流固耦合与板块运动，海洋生命过程及其适应演化机制，极地系统快速变化的机制、影响和可预测性，健康海洋与海岸带可持续发展，海洋智能感知与预测系统六个重要研究方向上取得颠覆性创新发展。到2035年，我国海洋科学力争建立以海洋为纽带的地球系统多圈层耦合理论体系、高精度智能的全球立体综合观测-探测-模拟-预测体系，在深海地球系统及相关的生命科学等领域取得一系列从0到1的重大突破，抢占国际海洋研究的制高点，实现我国海洋研究从跟跑、并跑到领跑的历史跨越，为应对全球气候变化、保障健康海洋、高效开发利用海洋资源、有效开拓深远海与极地战略新空间提供重要科学支撑，服务全球和我国气候、环境、资源等重大需求，为2030年前实现“碳达峰”与

2060年前实现“碳中和”的“双碳”目标做出贡献，提升我国在海洋管理和地球工程等全球事务上的话语权。

通过对比分析国内外海洋科学科研资助的现状发现，我国海洋科学研究资助布局主要存在以下问题：①引领国际大科学计划所需的实施政策不明确；②重大引领性科研的资助布局与评审机制不完善；③对海洋重大装备设施的综合投入与管理较为缺乏；④跨学科融合科技创新的资助政策较为缺乏；⑤海洋科学与技术协调发展所需的资助政策不健全；⑥资源与数据共享程度不高；⑦评价与激励机制推动力不足；⑧海洋科技经费投入总量不足、分配不均衡；⑨海洋科技经费使用效率不高。“十四五”期间，建议海洋科学领域从体制机制创新、资源配置方式和组织管理模式等方面实行进一步优化：①强化顶层设计，开展协同攻关：海洋学科链长、投入大、风险高、周期长，建议完善顶层设计和科学规划，坚持陆海统筹，实现近海-深远海-极地协同、科学-技术-产业协同、自主创新与国际合作等协同；②启动重大专项，建设“国之重器”：面向海洋科技前沿与国家海洋重大战略需求，尽快启动海洋物联网、海洋三维高分卫星等一批重大海洋科技专项，加强气候变化和生物多样性等方面的国际合作，加快建设大洋钻探船、新一代超算、深海空间站等一批海洋领域的“国之重器”；③创新科研组织模式，完善体制机制保障：建立“顶层目标牵引、重大任务带动、基础能力支撑”的科技组织模式，以重大专项为抓手，推进高校、科研院所、部门、行业、军队等协同创新，以及海洋与能源、材料、信息、空天、制造等领域的交叉研究，培养一批具有全球视野、国际竞争力和多学科交叉背景，同时兼备理论、模拟和观测能力的新型人才，加快海洋国家实验室建设，围绕海洋新兴领域如海洋大数据、人工智能、传感器、水下机器人等布局一批国家重点实验室和交叉协同创新中心。

Abstract

The ocean is the source of life and the regulator of global climate. It plays an essential role in the sustainable development for mankind and it is also the engine of Earth System Science's advance. First of all, earth system regulating on the heat cycle, water cycle and matter cycle is achieved with the ocean. Therefore, understanding the matter and energy cycles of the ocean is vital to address extreme weather events and climate change. In the second place, the ocean also nurtures the largest ecosystem with enormous values on the earth. Profound knowledge of marine life, rational resources development and blue biological resources conservation are the requirements of sustainable development. Furthermore, the ocean is the largest living space on the earth, as well as a natural strategic barrier and transportation lifeline for coastal countries. For this reason, it is crucial for coastal countries to improve their smart sensing and forecasting to marine environment. However, the ocean covers over 70 percent of the earth's surface while only 5 percent of it has been explored by human beings. Breeding endless imagination and creativity, the unknown ocean is going to be the birthplace of major scientific discoveries as well as the cradle of disruptive technological innovations.

Chapter 1 of the book provides a comprehensive summary of the growing strategic status of marine science. After the first chapter, an in-depth analysis of marine science development pattern, current situation and tendency is conducted with a highlight on China's strengths, weaknesses, interdisciplinary and emerging disciplines in marine science. Key measures to promote China's marine science are also discussed in Chapter 2 and 3. On this basis, related issues are further clarified

in Chapter 4 including the major breakthroughs, frontier scientific issues and the blueprint of China's marine science and technology. Chapter 5 proposes the general ideas for the development of China's marine science to 2035 : solving major basic scientific problems on the world's frontier; protecting people's life and health; building large research infrastructures and setting up "Big Science" projects to enhance the ability of ocean smart sensing and prediction; leading global marine science development through the launch of more international important science research plans. In addition, through a comparative analysis of the current situation of marine scientific research funding at home and abroad, this book points out the main problems in the arrangement of China's marine scientific research funding and meanwhile optimization suggestions are given out. Our aims are about accelerating the improvement of China's marine science and technology and increasing international competitiveness.

We should seize the golden opportunity of the United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) and aim at the major scientific frontiers in the international marine research field. Combining the current situation and the development tendency of marine scientific research in China, we will dedicate ourselves to achieve disruptive innovations on the following six important research fields: ocean energy transfer and matter cycle; multi-spherical fluid-solid coupling and plate movement; marine biological processes and their evolutionary adaption mechanisms; mechanisms, impacts and predictability of rapid changes in the polar system; healthy ocean and sustainable development of coastal zones; ocean smart sensing and prediction systems. By 2035, China's marine science will strive to establish theories of multi-sphere coupled Earth system with the ocean as the link, a high-precision and intelligent global system integrating with observation, detection, simulation and prediction, and a series of breakthroughs in the deep-ocean and related biological sciences. We will provide important scientific support for coping with global climate change, safeguarding healthy ocean, efficient exploiting marine resources, effective opening up new spaces in deep ocean and polar regions, and serving the major needs of global and China's climate, environment and resources. We will finally contribute to the goal of "carbon peak" by 2030 and the goal of "carbon neutrality" by 2060.

This study, formally started up in January 2020, is jointly funded by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) and the Academic Division

Abstract

of the Chinese Academy of Sciences (CAS) Discipline Development Strategic Research Program. After the launch, an expert group consisting of academicians in marine and related fields and experts from the Department of Geosciences of the NSFC was established. Our writing team includes outstanding young and middle-aged scientists in the marine field, and the working group is composed of outstanding young scholars. All teams cooperated with each other closely and finally successfully completed the research work.

目 录

总序 / i

前言 / v

摘要 / vii

Abstract / xv

第一章 科学意义与战略价值 / 1

第一节 海洋科学的学科地位与贡献 / 2

一、海洋科学主要发展阶段及对社会发展的贡献 / 2

二、地球系统科学中的海洋科学 / 8

三、海洋科学与未来人类社会可持续发展 / 14

第二节 海洋科学发展的创新驱动与学科整体效应 / 20

一、海洋科学具有鲜明的大科学特征 / 20

二、海洋科学的创新发展与多学科推动息息相关 / 27

三、海洋科学持续推动多学科发展 / 30

四、海洋科学在国家总体学科发展布局中的地位 / 34

第三节 海洋科学对实施国家战略的支撑作用 / 39

- 一、为维护国家安全提供支撑保障 / 40
- 二、为生态文明建设提供系统解决方案 / 41
- 三、为新兴产业发展启蒙赋能 / 44
- 四、为提升综合国力和国际竞争力保驾护航 / 47

本章参考文献 / 50

第二章 发展规律与研究特点 / 55

第一节 学科定义与内涵 / 56

- 一、研究对象 / 56
- 二、研究特点 / 57
- 三、学科分支 / 58

第二节 海洋科学的发展动力 / 69

- 一、海洋科学自身发展的需要是海洋科学发展的基本动力 / 69
- 二、国家需求是海洋科学发展的重要动力 / 74
- 三、人类可持续发展的巨大压力是海洋科学发展的外部动力 / 76
- 四、技术革新是支撑海洋科学迅速发展的动力源泉 / 78

第三节 海洋科学学科交叉状况 / 82

- 一、海洋科学学科交叉的意义 / 83
- 二、海洋科学内部分支学科与地球科学的融合交叉 / 84
- 三、海洋科学与基础科学的交叉 / 87
- 四、海洋科学与工程技术科学的交叉 / 94
- 五、海洋科学与社会科学的交叉 / 111

第四节 海洋科学知识溢出与成果应用 / 115

- 一、海洋科学在海洋安全与权益维护中的应用 / 115
- 二、海洋科学成果在海上工程、航道安全、渔业生产、资源开发中的应用 / 116
- 三、海洋科学成果在应对气候变化、防灾减灾中的应用 / 118

第五节 海洋科学人才培养特点 / 123

- 一、人才培养基本要求 / 123
- 二、人才培养特点 / 127
- 三、人才培养形式和体系 / 133
- 四、人才培养改革 / 138

本章参考文献 / 139

第三章 发展现状与发展态势 / 142

第一节 国际海洋科学发展趋势 / 144

- 一、国际海洋科学总体趋势 / 144
- 二、国际海洋科学发展方向 / 145

第二节 我国海洋科学发展现状 / 147

- 一、我国海洋科学研究发展态势 / 148
- 二、近十几年重要成果 / 153

第三节 我国海洋科学优势学科、薄弱学科和交叉学科发展状况 / 181

- 一、我国海洋科学的潜在突破点 / 181
- 二、薄弱环节和学科交叉前景 / 196

第四节 推动海洋科学发展的机遇与挑战 / 224

- 一、我国海洋科技的发展机遇 / 224

二、海洋科学发展面临的挑战 / 225

本章参考文献 / 228

第四章 发展思路与发展方向 / 243

第一节 推动海洋科学发展的关键科学领域 / 244

一、海洋与地球宜居性 / 244

二、海洋与生命起源 / 245

三、海洋可持续产出 / 246

四、海洋智能感知与预测 / 246

第二节 我国海洋科学发展总体思路 / 247

一、面向世界科技前沿，解决重大基础科学问题 / 247

二、服务国家战略需求，保障国家权益和人民生命健康 / 248

三、建设大科学装置、设立大科学工程，增强海洋智能感知和
预测能力 / 248

四、牵头国际大科学计划，引领国际海洋科学发展 / 249

第三节 我国海洋科学发展目标 / 249

一、2035 年前的总体发展目标 / 249

二、2035 年前的具体发展目标 / 250

第四节 我国海洋科学发展的重要研究方向 / 251

一、海洋能量传递与物质循环 / 251

二、跨圈层流固耦合与板块运动 / 253

三、海洋生命过程及其适应演化机制 / 255

四、极地系统快速变化的机制、影响和可预测性 / 257

五、健康海洋与海岸带可持续发展 / 261

六、海洋智能感知与预测系统 / 264

本章参考文献 / 268

第五章 资助机制与政策建议 / 271

第一节 国内外海洋科学研究资助的现状 / 272

- 一、我国海洋科学研究资助的历史沿革 / 272
- 二、世界主要海洋强国海洋科学研究的资助现状 / 274
- 三、我国海洋科学研究的资助现状 / 293

第二节 我国海洋科学研究资助布局存在的问题 / 310

- 一、引领国际大科学计划所需的实行政策不明确 / 311
- 二、重大引领性科研的资助布局与评审机制不完善 / 311
- 三、对海洋重大装备设施的综合投入与管理较为缺乏 / 311
- 四、跨学科融合科技创新的资助政策较为缺乏 / 312
- 五、海洋科学与技术协调发展所需的资助政策不健全 / 313
- 六、资源与数据共享程度不高 / 314
- 七、评价与激励机制推动力不足 / 314
- 八、海洋科技经费投入总量不足、分配不均衡 / 315
- 九、海洋科技经费使用效率不高 / 316

第三节 我国海洋科学研究资助机制与政策建议 / 316

- 一、建立健全引领国际大科学计划的资助政策 / 317
- 二、建立健全协调发展海洋科学技术的资助政策 / 317
- 三、设立统筹全国海洋科技发展的协调指导委员会 / 317
- 四、建立统筹协调海洋科技发展的资源共享与管理平台 / 318
- 五、大幅提高海洋科技经费投入和经费使用效率 / 318

中国海洋科学 2035 发展战略

六、完善同行评议机制，加强国际评审 / 319

七、设立博士后专项基金，完善人才资助格局 / 319

八、加强海洋科普，增加相应的资助类别 / 320

本章参考文献 / 320

关键词索引 / 322

科学意义与战略价值

海洋科学在地球系统科学中占据极为重要的地位。海洋科学的发展经历了科技与工业革命前的萌芽时期、工业革命推动下的创建时期以及信息科技革命推动下的新时代，为人类认知地球和生命的起源与演变、利用与保护自然资源、认知全球变化和治理生态环境等做出了巨大贡献。目前，海洋科学的研究发展趋向于解决资源、环境、气候等与人类生存发展密切相关的重大问题，趋向于多学科交叉、科学与技术紧密结合，也更加趋向于全球化和国际化。

海洋科学具有鲜明的大科学特征，需要且也会促进多学科深度融合。海洋科学的创新发展体现在观测与分析手段的持续变革、基础科学理论的不断建立以及前沿研究领域的积极拓展中。海洋科学领域的重要突破也促进了众多学科关键问题的解决，开辟了新的研究领域，有力推动了生命科学、信息科学、材料科学、能源科学、空间科学、社会科学等其他学科领域的发展。从海洋的自然属性、海洋强国的战略需求和人类可持续发展的角度，海洋科学对实施国家战略的支撑作用日益凸显，成为牵引相关学科发展的动力源泉。

党的十八大报告首次提出建设“海洋强国”。党的十九大报告指出，“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国”。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出需协同推进海洋生态保护、海

洋经济发展和海洋权益维护。发展海洋科学，掌握原创知识和先进技术，是建设海洋强国的必经之路。海洋科学维护国家海洋权益、服务海洋安全的最终目标是实现人类与海洋的和谐共生，保障国际社会的和平发展。海洋科学面临的关键问题与未来地球的宜居性息息相关，同时也是海洋生态文明建设的重要组成部分。开发海洋资源、发展海洋经济将成为区域经济与社会可持续发展的必然选择，推动海洋科技成果向现实生产力转化进而支撑海洋新兴产业发展，可以全面提升海洋经济增长的质量和效益，有力推动经济发展方式的质量变革、效率变革和动力变革。“海洋命运共同体”理念是中国为应对全球海洋秩序变革所提出的重要解决方案，海洋科学和技术的发展则是构建“海洋命运共同体”的重要理论支撑，是我国参与国际海洋事务的主要科学依据，是实现海洋强国战略和民族复兴的重要基础。

第一节 海洋科学的学科地位与贡献

一、海洋科学主要发展阶段及对社会发展的贡献

1. 海洋科学的主要发展阶段

(1) 科技与工业革命前的萌芽时期

人类对海洋的研究从远古时代就已开始，在沿海海洋资源开发和航海活动中，不断积累海洋知识（倪国江和韩立民，2008）。15世纪中叶，造船术、舵的使用、磁性罗盘导航等先进技术经郑和下西洋和“陆上丝绸之路”从阿拉伯国家逐步传入欧洲（许娟，2020），世界范围内出现了“海上丝绸之路”的探险热潮。不仅造船技术得以发展，同期也出现了潜艇和载人深潜器的设计。欧洲文艺复兴运动促进了人们追求财富的欲望，为新航路的开辟创造了思想基础，而科技的发展促进了航海技术的进步，并为海洋探险创造了条件（张中伟，2004）。哥伦布在西班牙的资助下，于1492～1504年四次横渡大西洋，到达美洲大陆并建立了欧美之间的贸易往来（劳伦斯·贝尔格林，

2022)。1519 ~ 1522 年，葡萄牙人麦哲伦率领的船队完成了人类历史上第一次环球航行，首次证实地球是圆的（孙洁，2011）。15 ~ 16 世纪地理大发现时代以及之后航海活动的开展，是早期海洋调查的雏形，极大地促进了海洋和地球科学的发展（张箭，2004）。这一时期的海洋科学研究或是依赖于随船现场观测资料的总结，或是根据数学、物理学原理进行的分析。达尔文于 1831 ~ 1836 年随英国的“比格尔”号进行海洋科考，收集并分析了各种海岸、海底的生物标本和岩石样本，完成了一系列的生物学和地质学专著，其中最著名的《物种起源》奠定了生物进化论的基础（梁前进等，2009）。牛顿根据万有引力定律解释潮汐，伯努利提出平衡潮学说，富兰克林发表了湾流图，拉瓦锡测定了海水的成分，之后拉普拉斯提出的大洋潮汐动力学理论为现代潮汐学理论体系奠定了物理基石。这些早期海洋探索者与研究者是海洋科学理论的先驱。

(2) 工业革命推动下的创建时期

18 世纪末，第一次工业革命后，伴随着蒸汽机的出现，改变了人类在海上的交通方式，也加速了海洋科考的步伐。1872 ~ 1876 年，由风帆和蒸汽机提供混合动力的“挑战者”号经英国皇家学会组织开展了一次划时代的环球航行考察（韩毅，2009）。此次考察在三大洋和南极海域进行了数百个站位的系统性、多学科综合性观测，取得了大量研究成果。“挑战者”号环球航行考察使海洋科学从传统的地理学领域分立出来，逐渐形成成为独立的学科，因此也被认为是现代海洋科学的开端。“挑战者”号环球航行考察掀起了世界性海洋调查研究的热潮，世界强国 [如德国、挪威、荷兰、英国、美国、苏联（俄罗斯）等] 先后组织进行了海上调查。19 世纪末至 20 世纪初，第二次工业革命又将科学技术和工业生产推向新的高峰，世界由蒸汽时代进入电气时代，内燃机、发电机、电动机的出现极大地改变了工业生产的形态，造船和运输行业飞速发展，世界各国建设专门的海洋调查船，设计制造各种海洋观测和分析仪器（周友光，1985）。海洋科学研究开始由探索性航行调查转向特定海区的专门性调查。1925 ~ 1927 年德国“流星”号科考船在南大西洋进行了 14 个断面的水文测量，1937 ~ 1938 年又在北大西洋进行了 7 个断面的补充观测，共获得 310 多个水文站点的观测资料。这次调查以物理海洋学为主，内容包括水文、气象、生物、地质等，并以观测精度高著称。这次调查的一

项重大收获是探明了大西洋深层环流和水团结构的基本特征。随着第二次世界大战的爆发,反潜技术推动了水下声学的飞速发展,导致了回声测深仪的出现。在首次使用回声测深仪探测海底地形时,即发现海底也像陆地一样崎岖不平,从而改变了以往所谓“平坦海底”的概念。电子学的发展,导致了盐度(电导)-温度-深度仪(CTD)的出现。利用CTD和使用传统的颠倒式水银温度计与盐度测定方法间的争议、改进、校正和认证持续了20~30年(王修林等,2008)。

这些海洋调查工作,一方面积累了大量资料,观测到许多新的海洋现象,同时在技术方面为观测方法的革新准备了条件。它推动了海洋科学中物理海洋学、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,使海洋科学成为多领域的综合性学科。在物理海洋学领域,建立了大洋环流理论;在海洋化学领域,建立了盐度测定方法,发现了海水中主要溶解成分比例恒定规律、氮磷循环及碳酸盐理论;在海洋生物学领域,以海洋生物调查为主,建立了食物链、食物网和生态动力学理论;在海洋地质学领域,发现了洋脊和海沟、锰结核、沉积物的主要来源和分布,以及沉积物中的生化过程对物质循环的贡献等。由斯维德鲁普、约翰逊和福莱明合著的 *The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology* 一书(Sverdrup et al., 1942),对此前海洋科学的发展和研究给出了全面系统而又深入的总结,其中关于海洋地质学的内容稍显薄弱,但随着谢帕德 *Submarine Geology* (Shepard, 1973) 和肯尼特 *Marine Geology* (Kennett, 1981) 等著作的出版而补全。

(3) 信息科技革命推动下的新时代

20世纪40年代,人类在原子能、电子计算机、微电子技术等领域取得重大突破,第三次科技革命中最具划时代意义的是电子计算机的迅速发展与广泛应用。电子计算机的发明为海洋科学研究提供了重要的分析工具,信息时代也拉近了全球海洋科技工作者的距离,促进了海洋科学之间的多学科融合,也为开展大规模、跨区域的海洋科学研究奠定了基础(李晓东,1999)。此时综合性海洋调查已经无法满足海洋科学的发展,开始陆续出现各种专业的调查船和特种调查船。随着电子技术的突飞猛进以及海洋调查设备越来越先进,现代化高效率的海洋调查船逐渐诞生,1962年美国建造的“阿特兰蒂斯II”号科考船首次安装了电子计算机,标志着海洋科学进入现代化高效率海洋调

查时代（葛运国，1984）。第二次世界大战结束后的几十年间，各国政府对海洋科学研究的投入也大幅度增长，海洋调查船数量成倍增加；同时，计算机、微电子、声学、光学和遥感等技术广泛地应用于海洋调查和研究中，如CTD、声学多普勒流速剖面仪（acoustical Doppler current profiler, ADCP）、锚泊海洋浮标、地层剖面仪、侧扫声呐、深潜器、海底深钻、水下机器人、水下滑翔机、气象卫星、海洋卫星等。美国、苏联、英国、日本等国利用现代化的海洋调查船，开展了大规模的全球海洋调查，获取的数据涉及物理海洋学、海洋化学、海洋生物学、海洋地质学等海洋科学的各个方面，取得了一系列的原创性成果，奠定了现代海洋科学研究的根基。20世纪70~80年代卫星和光学技术的出现促进了海洋遥感技术的发展，80~90年代出现了一系列的温度和水色遥感卫星。电子、声学、光学和遥感等技术给海洋学带来了巨大的“数据革命”，数据量增加了 $10^4 \sim 10^6$ 倍（张志刚和张磊，2006）。近二十多年，卫星通信和互联网成为海洋信息交流、科学技术、计算和研究不可缺少的重要技术支撑，也为大数据分析和人工智能的发展提供了基础。

各国科学家在长期的调查研究中认识到海洋环境的复杂性，而这种复杂性致使任何单一国家都难以承担完整的、大型的研究计划。因此从20世纪中期开始，许多大型的海洋调查研究都是以国际合作的方式开展。例如，1968年美国国家科学基金会组织的“深海钻探计划”（Deep-Sea Drilling Project, DSDP）（沈锡昌，1989），在1975年扩大为“大洋钻探计划”（Ocean Drilling Program, ODP）。进入21世纪后，该计划进一步扩大，成为“国际大洋发现计划”（International Ocean Discovery Program, IODP）。参加该计划的除发起国美国外，还有法国、英国、苏联（俄罗斯）、日本和德国，我国于1998年成为参与成员国。通过该计划的实施，科学家借助多种平台计划打穿大洋壳，进行海底环境监测和采样，为板块学说的确立、地球环境的演化、地球系统行为的研究提供了极其丰富的资料（沈建忠，1998）。20世纪70年代开始实施的海洋地球化学断面研究（Geochemical Ocean Sections Study, GEOSECS）计划，首次较全面地勾画了全球各大洋盆的物理和化学参数格局（武心尧等，1996）；80年代开展的为期十年的世界大洋环流试验（World Ocean Circulation Experiment, WOCE）扩展并延续了GEOSECS的研究；90年代开始的全球大洋通量联合研究（Joint Global Ocean Flux Study, JGOFS:

1990 ~ 2004 年)建立了海洋碳通量的生物泵和微生物圈理论;全球海洋生态系统动力学研究计划(Global Ocean Ecosystems Dynamics, GLOBEC: 2001 ~ 2010 年)推动了中尺度物理、生化和生物相互作用与生态动力学研究;自 1998 年开展的实时地转海洋学阵计划(Argo 计划)实施以来,得到了全球海洋 2000m 以内的温盐剖面等准实时观测数据,为海洋环境预报和气候变化研究提供了可靠的基础;2010 年后国际痕量示踪项目(An International Study of the Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Isotopes, GEOTRACES: 2010 年至今)(Anderson et al., 2014)、南大洋观测系统(The Southern Ocean Observing System, SOOS: 2010 年至今)、国际海洋生物圈整合研究计划(Integrated Marine Biosphere Research, IMBeR: 2011 年至今)、联合国海洋科学促进可持续发展十年(United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development: 2021—2030 年)等国际大型综合性研究计划纷纷建立(国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2012)。

与过去相比,科学家在这短短几十年取得了更加丰硕的研究成果,重要的突破更是屡见不鲜。大陆漂移学说、海底扩张学说、板块构造理论是水下声学技术、海洋地质与地球物理研究结出的硕果,从根本上动摇了以固定论哲学为基础的地槽论的统治,被誉为地质学的一场“革命”(赵文津, 2009)。卫星遥感技术的发展,使学者发现海洋实际上是涡旋的世界,中尺度变化的动能占海洋流场的 90% 以上,这颠覆了经典海洋环流理论所描绘的情景(杨昆等, 2000)。深潜技术的发展,海底“热液”和“冷泉”的发现,给予了海洋生物学和海洋地球化学新的启示(曾志刚, 2011)。化学分析与显微技术的发展,颠覆了海洋中营养盐和生物物质循环过程的认识,建立了微生物圈理论。大洋环流理论、海浪谱理论、海洋生态系统、热带大洋和全球大气变化等领域的研究都获得了突出的进展与成果,均与观测技术的发展和经济社会的需求紧密联系。

(4) 未来海洋科学研究的发展范式

海洋环境由海水环境和海底环境两部分组成,多种因素并存且包括互相影响的流动水体,只有开展综合性的交叉研究,海洋科学研究才能迸发出强大的创新动力。新时代的海洋科学研究将会更加趋向于多学科交叉、渗透和综合,这使得各基础学科之间的关系更加紧密,也将促使一系列边缘学科的

产生。由于陆地资源日趋枯竭，人类对海洋资源的需求日趋迫切，海洋科学研究越来越关注与资源、环境和气候相关的课题。因此，新时代的海洋科学研究将会趋向于解决资源、环境、气候等与人类生存发展密切相关的重大问题。海洋中的各种现象和过程十分复杂，时间和空间跨度很大，单纯依靠一地或一国的力量无法完成如此大时空尺度的观测和研究。新时代的海洋科学研究方式更加趋于全球化和国际化，将通过开展广泛的国际合作拓宽研究领域的时空尺度。由于认识海洋的手段，如深潜技术、钻井技术、高精尖仪器和海洋遥感手段的不断进步，获取资料的能力和水平不断提高，新时代海洋科学的研究手段将与新型探测取样技术、大数据、人工智能结合更加紧密，其研究将更加趋于全覆盖、立体化、自动化、信息化和智能化。

2. 海洋科学对社会发展的贡献

地球被称为水的行星，其 71% 的表面被海洋覆盖，人类对海洋的认知贯穿经济社会发展的始终，对海洋战略地位及其价值的认识随海洋研究、开发和保护等人类活动的发展而不断深化。海洋科学为人类认知地球和生命起源与演变、利用与保护自然资源、认知和治理全球变化与生态环境等做出了巨大贡献。

(1) 海洋科学为地球起源与形成提供理论依据

深海钻探和海洋地球物理探测技术的快速发展，海洋科学在方法和理论上的不断突破，为重建地球演变研究提供了重要依据。例如，基于海洋地质研究和海洋地球物理探测技术发展起来的板块构造理论，将大陆漂移、海底扩张、地震、火山活动、山脉演变、矿床生成等纳入统一的理论体系，比较合理地解释了大陆和海洋盆地的现代格局，为进一步揭示地球的起源和形成、内部结构以及演化规律提供了重要的理论根据。

(2) 海洋科学加深了人类对生命起源的认识

海洋中栖息着种类繁多、数量巨大的海洋生物。随着深海观测技术的发展，发现海洋深部的某些生物能在海底高温、高压条件下依赖化学合成作用而生存，有力地支撑了生命起源于海洋的假设，极大地加深了人类对生命起源与演化以及生命活动规律的认识。

(3) 海洋科学加强了人类开发海洋资源的能力

海洋丰富的生物资源为人类提供了优质蛋白，丰富的矿产油气资源为人

类提供了发展动力，各类海洋可再生能源为人类提供了丰富的绿色能源储备。随着海洋科学与技术的进一步发展，水资源、空间资源、矿产油气资源、生物资源等将被进一步开发，并为人类的可持续性发展提供丰富的潜在资源。

(4) 海洋科学加深了人类对气候变化的认识

海洋在全球气候系统中扮演着重要角色，它通过与大气的能量物质交换和水循环等作用影响气候。随着全球海洋输送带（经圈翻转环流）的发现，人类深入认识到海洋在全球能量、水汽平衡、二氧化碳吸收等调节气候变化中的作用。工业革命后，人类活动造成的二氧化碳排放和热量释放急剧增加，海洋作为“地球气候的调节器”也发挥着更大的作用。对海洋影响气候变化及其响应机理的理解，将进一步加深人类对气候变化的认识，提高人类应对气候变化挑战的能力。

(5) 海洋科学加深了人类对全球生态系统平衡的认识

海洋是地球生物圈、水圈、岩石圈的重要组成部分和相互作用带，海洋的微生物提供约一半的地球氧气、参与了陆源有机物质的再矿化及再循环，海洋中的生物资源是人类需求蛋白质的主要来源之一，海洋对维持全球生态系统平衡起着重要作用。海洋科学的发展进一步揭示了海洋在三大圈层中的作用以及三大圈层在海洋中相互作用的规律，加深了人类对海洋在全球生态系统中作用的认识。

(6) 海洋科学加深了人类对地质历史的认识

深海沉积物主要有陆源碎屑、生物组分（钙质和硅质）、火山碎屑、自生沉积和宇宙尘埃五个来源，蕴含着丰富的地质历史与环境信息。通过海底沉积物样品，可以了解地球地质结构演化过程以及矿产资源的形成、气候环境的变化等过程。深海沉积物与冰心、中国黄土都记录了地质历史的变迁并可以进行相互印证。

二、地球系统科学中的海洋科学

1. 海洋在地球系统中的重要地位

海洋是地球系统中连接大气圈、生物圈、冰冻圈和岩石圈乃至地球深部的重要单元。大陆与大洋之间的相互作用，海底和其中的地质构造运动从根

本上塑造了海洋的形状，并左右着海洋盆地的形成和演化。海水与大陆、大气及海底之间发生着各种尺度、形式的物质和能量交换，对海洋的物理、化学和生物学过程都产生了深刻的影响；同时，海洋与陆地、大气之间的物质能量交换，也显著影响着陆地、大气组成成分和气候系统。对于大气圈，其气候变化的动力很大程度上来源于海洋。海洋碳储量是大气的 60 倍，工业革命以来海洋吸收了人为排放二氧化碳的 48% (Sabine et al., 2004)，海洋的存在极大地缓冲了大气二氧化碳的增加和温室效应的加剧。水汽蒸发、凝结过程中吸收或释放的大量潜热也对地球表层热量循环起着重要作用。生命起源于海洋，海洋中孕育着丰富多样的生物，是生物多样性和生态系统多样性的主要存储库。海底中蕴藏着全球 75% 的石油和天然气资源，天然气水合物具有极大的开发和应用前景，大洋底部还蕴藏着丰富的多金属结核、热液硫化物等固体矿产资源。极地是地球气候系统的巨大冷源，是水循环和气候变化的重要区域以及对全球变暖响应最为剧烈的区域，也是地球陆、海、冰和大气多圈层相互作用复杂的典型区域。南大洋的碳埋藏占全球大洋的 25% ~ 50%。磷虾是海洋中的重大生物资源。冰封在极地冰冻圈中的微生物是生命进化的样品库，更是生物药物的巨大宝库，但也是未来潜在病毒的重要来源。近海和海岸带是地球系统中水圈、岩石圈、生物圈和大气圈的交汇地带，是陆地、海洋、大气之间物质和能量交换以及多尺度过程相互作用最活跃的地带。全球约 40% 的人口居住于离海岸线 100km 以内的陆地上，这里是人类活动最集中、经济最繁荣、社会最发达的地区。从海陆作用、生命现象，到人类活动、实现人类和海洋的和谐共生，近海和海岸带在空、天、海、地、生及人一体化进程中发挥着重要的作用。

2. 海洋科学在地球系统科学中的重要地位

随着科学认识的提高，20 世纪 80 年代国际科学界正式提出地球系统科学的概念，强调地球作为一个整体。海洋由海水、生物和海底构成，是连接大气圈、生物圈和岩石圈的桥梁，了解海洋不仅需要认识海水中的物理过程、化学组成和生命活动，也需要掌握海底的结构与物质组成。海洋科学是地球系统科学的重要组成部分，扮演着极为重要的角色。海洋圈层、大气圈层、陆地圈层和地球深部圈层构成了地球的完整系统，其形成、演化理论体系的

建立也需要海洋科学与其他地球系统科学分支的融合。海洋科学与地球系统科学其他学科的交叉融合，为学科发展提供了新的视角和思路，孕育出新的学科增长点，并为理解地球在多时空尺度的宜居性提供有力支撑。

全球气候变化和应对已经成为国际关注的主要问题，海洋科学是理解全球气候变化的关键要素之一。热带海洋-大气相互作用是热带气旋和厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-southern oscillation, ENSO）的主要驱动机制，后者强烈地影响着全球气候变化。极地海洋、冰与大气间的相互作用一方面体现了对气候变化的响应，另一方面也对全球气候产生深刻的影响，冰川的融化直接造成海平面上升，绕极深层水和极地底层水的形成是驱动经圈翻转环流的重要机制。大洋经圈翻转环流则调控着全球纬向热通量与气候变化。

但受限于科技水平和观测手段，过去对海洋的理解更多地局限于其上层，而对平均深度 3800m 的深海海底的了解还不如对月球表面。随着科学技术的发展，人类对海洋尤其是对深海有了越来越多的认识。这些深海发现，不断突破人类对地球系统科学的认知，成为地球系统科学重大发现的突破口。大洋钻探证明了板块构造理论，催生了古海洋学（paleoceanography）。深海沉积物蕴含丰富的环境信息，是记录气候变迁的主要载体，在全球变化研究中起到了举足轻重的作用。长期以来，人类认为深海是个没有生命没有运动的世界，但近几十年来发现在深海极端环境中大量不为人知的生物，深海冷泉、热液等环境下的生态系统，证明地球上存在着另一种生命运作形式——暗能量生物圈，这突破了人们对生命现象和地球系统科学的认知，为极端环境下生态系统演化乃至生命起源研究注入了活力，推动了生命科学的发展。

未来的能源和矿产资源很大程度上也要依赖深海。深海蕴藏着丰富的油气和金属矿产资源，全球新增油气储量超过一半来自深海。深海有大量的锰结核和富含稀土的软泥，是潜在的接替资源。深海热液系统是研究热液矿床成因的天然实验室，能够推动成矿理论的进步。深海环境中的生物是一种极其宝贵的种质资源，有许多非常重要的特殊基因和独特的生物酶，可以很好地应用到环保、冶金、能源、电子、材料、医药、食品等各类工业的生产中。深海极端环境生物通过合成各种化学组分来适应各类极端环境条件，可以在各种极端环境条件下得到广泛应用。因此，深海极端地质环境微生物的研究