大洋科学钻探特点与发展趋势

——基于国际大洋发现计划科学框架的对比分析

徐晶晶，张涛，吴林强，蒋成竹，冉皞

（中国地质调查局发展研究中心 北京 100037）

摘要：大洋科学钻探计划是地球科学领域迄今为止历时最长、成效最大的国际科学合作计划。自1968年以来，先后经历了深海钻探计划、国际大洋钻探计划、综合大洋钻探计划和国际大洋发现计划4个阶段。进入国际大洋发现计划，IODP工作组两次发布科学框架，文章对两个科学框架进行了对比分析。大洋科学钻探的特点和发展趋势是坚持解决重大科学问题，由地球拓展到太阳系，重视技术和大数据，以及扩大社会影响和宣传。这给我国发起国际大科学计划提供了启示，一要注重科技创新，运用大数据等先进技术；二要加强科学管理，促进开放和共享；三要重视提升影响力，扩大宣传和影响。

关键词：大洋钻探；科学框架；对比分析；发展趋势

中图分类号：P7 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2023)03－0030－09

Characteristics and Development Trends of Ocean Scientific Drilling: Comparative analysis based on the scientific framework of International Ocean Discovery Plan

XU Jingjing, ZHANG Tao, WU Linqiang, JIANG Chengzhu, RAN Hao

(Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Scientific ocean drilling program is the longest and most effective international scientific cooperation program in the field of earth science. Since 1968, it has experienced four stages: Deep Sea Drilling Project, Ocean Drilling Program, Integrated Ocean Drilling Program and International Ocean Discovery Program. Entering the International Ocean Discovery Program, the IODP Working Group released the scientific framework twice, and this paper provided a comparative analysis of the two scientific frameworks. The characteristics and development trend of scientific ocean drilling were to persist in solving scientific problems, expand from the earth to the universe, attach importance to technology and big data, and expand social influence and publicity. This had provided enlightenment for China to launch the international big science program. Attention should be paid to scientific and technological innovation and big data and other advanced technologies that would be used firstly, to strengthen scientific man-

收稿日期：2022-06-17；**修订日期**：2023-02-20

基金项目：中国地质调查局“地质调查战略规划政策研究”项目(DD20221828).

作者简介：徐晶晶，工程师，硕士，研究方向为海洋地质与科技战略研究

agement and promote openness and sharing secondly, and pay attention to enhancing influence and expanding publicity and influence finally.

Keywords: Ocean Drilling, Scientific Framework, Comparative analysis, Development Trend

0　引言

大洋科学钻探计划自 1968 年启动开始，迄今已有 50 余年，先后经历了 4 个阶段（图 1）。深海钻探计划（Deep Sea Drilling Program，DSDP，1968—1983 年）、国际大洋钻探计划（Ocean Drilling Program，ODP，1985—2003 年）、综合大洋钻探计划（Integrated Ocean Drilling Program，IODP，2003—2013 年）和正在进行的国际大洋发现计划（International Ocean Discovery Plan，IODP，2013—2023 年）是地球科学领域迄今历史最长、规模最大、影响最深、成效最大的国际科学合作研究计划，也是引领当代国际深海探索的科技平台[1−9]。所取得的科学成果验证了板块构造理论，揭示了气候演变的规律，发现海底“深部生物圈”和“可燃冰”，创造了地球科学一次又一次的重大突破，始终站在国际学术领域前沿[2, 10−11]。目前，共有 23 个国家参与 IODP，包括美国、日本、中国、欧洲 15 国、韩国、印度、巴西及澳大利亚和新西兰等。

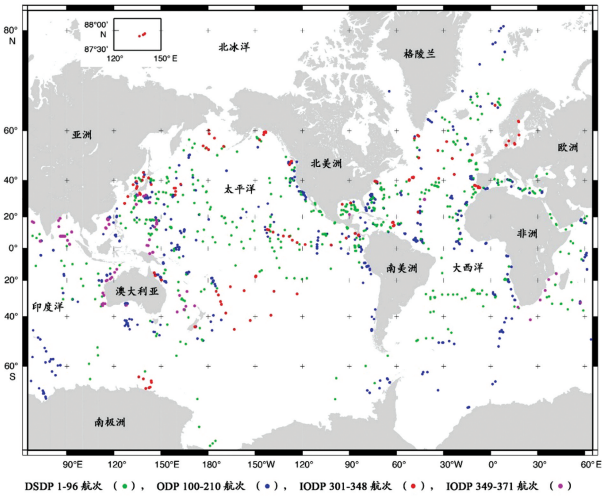

图 1　截至 2018 年 1 月大洋钻探执行的全部航次站位分布[13]

Fig. 1　The distribution map of all voyage stations executed by international ocean drilling by January 2018[13]

2023 年第 4 阶段任务即将到期，IODP 工作组编写了面向 2050 年的大洋科学钻探框架，提出了七大战略目标、五大旗舰计划和四大能力建设举措[12]。本研究对大洋科学钻探面向 2050 年科学框架和 2013—2023 年科学计划进行了对比分析。

1　大洋科学钻探进展与成果

截至 2021 年 11 月，大洋科学钻探已经在世界各大洋执行了 303 个航次，完成了 1 732 个站位的钻井 4 043 口，采集了超过 45.3 万 m 的岩心和大量的观测数据（表 1）。各国学者利用这些地质资料实现了一系列科学突破，如验证海底扩张和板块构造、重建地质历史时期气候演化、证实洋壳结构、发现深部生物圈等。这不仅使我们更加全面地认识地球的过去与现在，也为预测未来全球变化提供了重要参考[1, 5]。

表 1　截至 2022 年 4 月大洋钻探执行的全部航次工作量汇总[14]

Table 1　Summary of the total expeditions workload of international ocean drilling by April 2022[14]

工作量汇总	DSDP（1968—1983 年）	ODP（1985—2003 年）	IODP（2003—2013 年）			IODP（2013—2022 年 4 月）		
钻井平台	“格罗玛·挑战者”号	“乔迪斯·决心”号	“乔迪斯·决心”号	“地球”号	特定任务平台	“乔迪斯·决心”号	“地球”号	特定任务平台
航次总数/个	96	111	35	14	5	36	4	4
站位总数/个	624	669	145	37	67	163	6	28
钻孔总数/个	1 053	1 797	439	95	115	460	19	80
总取心数	19 119	35 772	8 491	927	2 676	11 617	204	929
最大钻孔深度/m	1 741	2 111	1 928	3 059	755	1 806	1 180	1 335
最大钻探水深/m	7 044	5 980	5 708	6 929	1 288	5 023	4 776	8 023
成功取心长度/m	97 056	222 704	57 289	4 886	4 131	65 860	1 092	3 374

1.1　深海钻探计划（DSDP）阶段

深海钻探计划（DSDP，1968—1983 年）是由美国主导的海洋钻探计划，通过在世界大洋大量布设钻井，广泛采集沉积岩心，取得洋底地壳上层的资料。在这 15 年里，利用“格罗玛·挑战者”号完成了

96 个航次，并在除北冰洋以外的各大洋 624 个站位上钻井 1 053 口，获取岩心 97 056 m。该阶段钻探验证了海底扩张和板块构造学说，钻探了太平洋边缘俯冲带、洋壳基底火成岩，揭示了新生代以来古温度演化，发现了有机碳含量极高的白垩纪黑色页岩，验证了著名的热点假说，发现了深部生物圈[1, 5, 15−16]。

1.2 大洋钻探计划(ODP)阶段

大洋钻探计划(ODP，1985—2003 年)是通过在大洋底部钻探采集洋底沉积物、岩石样本并利用钻孔进行井下测试和实验的国际合作项目。我国于 1998 年 4 月正式加入 ODP 计划。在这 18 年里，利用“乔迪斯·决心”号实施了 111 个航次的调查，在 669 个站位上钻井 1 797 口，获取岩心 222 704 m。该阶段钻探验证了大西洋贫岩浆型大陆边缘的破裂与洋壳的形成，揭示了喜马拉雅山的隆升过程和其风化作用对海洋化学的影响、地球轨道周期与地中海沉积、大火成岩省的环境效应，证实了南极与澳大利亚的分离导致南极冰盖的形成，钻取了天然气水合物，钻探了海底热液硫化物矿床[1, 5, 16−18]。

1.3 综合大洋钻探计划(IODP)阶段

综合大洋钻探计划(IODP，2003—2013 年)致力于开展一系列针对地球系统的、以过程为导向的研究计划，更加强调不同国家、组织之间的协同联系，一方面使用多种钻井平台以及先进的采样和观测技术；另一方面加强与其他国际性地学研究计划以及石油工业界的合作。在这 10 年里，利用“乔迪斯·决心”号“地球”号和特定任务平台，累计完成 54 个航次，在 250 个站位上钻井 649 口，获取岩心 66 306 m。该阶段钻探推动了固体地球和地球动力学发展，唤醒了公众对全球气候环境变化重要性的认识，揭示了古新世/始新世大暖期，恢复了新时代赤道地区碳酸盐补偿深度(CCD)演化历史，重建了高分辨率的海平面变化记录，实现了深部生物圈的新发现，探索了天然气水合物研究的新领域[1, 5, 19−20]。

1.4 国际大洋发现计划(IODP)阶段

国际大洋发现计划(IODP，2013—2023 年)致力于气候与海洋变化、生物圈前沿、地球联系和活动的地球等四大科学主题研究。名称的变化体现了该阶段在钻探目标和研究思路上的调整，以及对新方向和新前景的期待。一方面，是为了适应当前科学发展和社会经济可持续发展的需求所进行的必要调整；另一方面，有望构筑起国际地球科学学术界—工业界的研究合作平台，从而更好地为深海新资源勘探开发、环境预测和防震减灾等社会目标服务，而且也为应对气候和环境变化提供政策指导。截至 2020 年 11 月，利用“乔迪斯·决心”号“地球”号和特定任务平台，累计完成 42 个航次，在 189 个站位上钻井 544 口，获取岩心 67 393 m。该阶段钻探证实了大陆破裂的新模式，探索了新生代以来亚洲季风、印度—太平洋暖池为代表的气候演变热带过程，研究了基性/超基性岩蛇纹石化或者海底风化的生物和非生物过程，提升了预测未来、预警灾害的能力[1, 5]。

2 两个阶段科学框架发展路线对比

2011 年，IODP 工作组出版《照亮地球：过去、现在与未来——IODP 科学计划(2013—2023 年)》。该科学计划是在前 3 个阶段大洋钻探计划的基础上进行的，聚焦 4 个重要主题，每个主题包含一系列最紧迫的科学挑战问题，目的在于指导大洋科学钻探在 2013—2023 年的多学科国际合作，帮助我们更好地理解地球的过去，更好地预测地球的未来[19]。这些主题和科学挑战具有同等的重要性，没有提出具体的发展路线。

2020 年，IODP 工作组出版《大洋科学钻探探索地球——面向 2050 年的科学框架》。该科学框架的首要目标是加深我们对地球系统的理解，重点关注地球系统的相互联系、关键环节、演化过程、反馈机制和翻转点，提出了“一七五四八”的发展路线，即以一个地球系统为核心，统筹七大战略目标，执行五大旗舰计划，增强四大能力建设，坚持八项指导原则。

2.1 一个地球系统

地球是一个复杂的、相互联系的系统(图 2)。动态地球、其气候和环境，以及所有在此起源、进化的生命，都存在内在联系，这些地球系统的组成部分又与控制地球过程和反馈的周期和速率、自然灾害的位置和强度，以及全球海洋的健康和宜

居性有关。大洋科学钻探可以部署设备对海底进行长期观测，提供海底沉积物、连续岩心和微生物等样品，科学家通过观测信息研究相互联系的地球系统是如何工作的，并建立揭示真相的地球模型，这将推动对整个地球科学的认知极限，甚至超越地球科学。

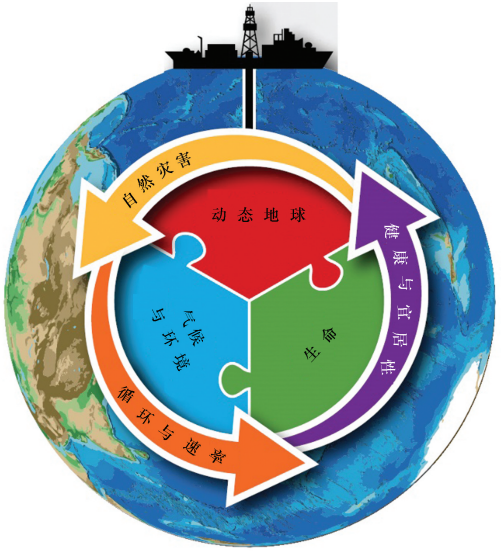

图 2　相互联系的地球系统[3]

Fig. 2　The interconnected earth system[3]

2.2　七大战略目标

战略目标包括广泛的地球科学研究领域，涵盖了整个地球系统相互联系的过程和反馈，每个目标都侧重于了解地球系统内部的相互联系，构成了到 2050 年大洋科学钻探的基础。这些目标是多学科的、开放的，超越了以往大洋科学钻探的传统主题，鼓励科学思想的创新与演变。七大战略目标分别是地球上的生命和宜居性、板块的生命周期、地球气候系统、地球系统反馈机制、地球历史的翻转点、全球能量和物质循环，以及影响人类社会的自然灾害（图 3）。

2.3　五大旗舰计划

旗舰计划由历时 10～20 年的多次大洋科学钻探来完成，通常结合多个战略目标，是长期的研究工作。每一项多学科研究的目标都是检验科学范式和假设，涉及与社会密切相关的问题。旗舰计划通常结合多个战略目标的研究目标。旗舰计划的执行取决于科学建议，这些科学建议制定的协调战

图 3　大洋科学钻探面向 2050 年科学框架的七大战略目标[3]

Fig.3　The strategic objectives of Scientific Ocean Drilling for 2050 scientific framework[3]

略，包括长期计划、技术发展以及对已有或新的大洋科学钻探数据的创新应用。五大旗舰计划分别是未来气候变化真相、地球深部探测、地震和海啸灾害评估、海洋健康诊断，以及生命及其起源探索（图 4）。

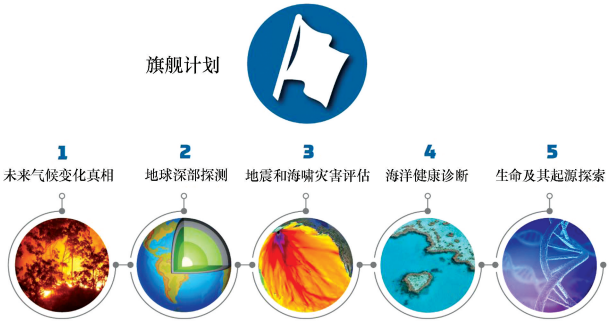

图 4　大洋科学钻探面向 2050 年科学框架的五大旗舰计划[3]

Fig.4　The flagship initiatives of Scientific Ocean Drilling for 2050 scientific framework[3]

2.4　四大能力建设

能力建设是通过各种广泛的影响和外联举措，

与具有互补科学目标的组织协作，建立伙伴关系，以及持续的技术开发和先进数据分析的创新应用，进而显著推进大洋科学钻探目标的实现。四大能力建设分别是扩大影响和宣传、由大陆科学钻探到大洋科学钻探、由地球到星外，以及技术研发与大数据分析。

2.5 八项指导原则

科学框架的实施需要一种国际方法和一套连贯一致的指导原则，以便将未来的大洋科学钻探信息电子化，是大洋科学钻探可持续发展的重要措施。这 8 项指导原则遵循了当前大洋科学钻探的优势，分别是开放样品和数据、统一测量标准、自下而上提交建议书和同行评议、透明的区域规划、通过现场特征提升安全性和成功率、定期框架评估、协作和包容的国际方案，以及加强多样性。

3 两个阶段科学框架战略目标发展重点对比

地球系统的所有组成部分，包括固体地球、水圈、大气圈、冰圈和生物圈，都通过物质、能量流和生命的流传联系在一起[19]。大洋科学钻探是通过地质钻探探索整个地球系统，也是评估现代地质过程和影响人类社会的自然灾害的卓越工具[3]。两者都向科学界抛出了一系列基础性问题，为全球海洋海底大范围、多学科的开拓性研究奠定了基础。

IODP 科学计划(2013—2023 年)聚焦 4 个重要主题，分别是气候与海洋变化、生物圈前沿、地球联系，以及活动的地球。在此基础上，面向 2050 年科学框架提出了七大战略目标，包括广泛的地球科学研究领域，为 2050 年大洋科学钻探奠定了基础。根据发展的延续性和侧重点，对两个阶段科学框架的战略目标发展重点进行对比如下。大洋科学钻探 2013—2023 年科学计划目标[19]研究主题及面临的挑战。

(1)气候与海洋变化：解读过去，预示未来。①地球气候系统对大气 CO_2 浓度提高如何响应；②冰盖和海平面对气候变暖做何反应；③降水分布由什么控制，如季风和厄尔尼诺的降水分布是受什么控制的；④大洋化学成分发生变动后，是如何恢复的。

(2)生物圈前沿：深部生命、生物多样性和环境驱动的生态系统。①海底群落的起源、组成及全球意义是什么；②海底深部的生命极限是什么；③生态系统和生物多样性对环境改变的灵敏程度如何。

(3)地球联系：深部过程及其对地表环境的影响。①地球上地幔的组成、结构和动力学是什么；②海底扩张和地幔熔融如何与洋壳结构相联系；③洋壳与海水之间化学变换的机制、程度和历史是什么；④俯冲带如何开始形成，挥发性物质如何循环，陆壳如何形成。

(4)活动的地球：人类时间尺度上的灾害与过程。①破坏性地震、滑坡、海啸发生的控制机制是什么；②支配碳在海底以下储存和运移的因素和过程有哪些；③流体与海底以下构造、热和生物地球化学过程的联系如何。

大洋科学钻探面向 2050 年科学框架战略目标及重点研究方向[3]。

(1)地球上的生命和宜居性——定义海洋环境中生物生存条件极其生命作用。重点研究方向：①宜居性和深部生物圈；②栖居海底的生命类型；③微生物在地球历史中的作用；④海洋生物群落和生物泵；⑤影响海底宜居性的行星过程。

(2)板块的生命周期——研究海洋岩石圈的形成、年龄、运动和破坏。重点研究方向：①确定板块构造生命周期；②全新大洋的形成；③洋壳起源；④洋壳成熟；⑤蛇纹石化过程；⑥热点火山活动和大型火成岩省；⑦俯冲带中的板块破坏；⑧俯冲作用起源。

(3)地球气候系统——检验冰盖、海洋和大气动力学以及海平面的变化规律。重点研究方向：①通过钻探理解气候系统；②海洋环流是气候变化的诱因；③水文气候行为和季风的影响；④气候系统中的遥相关；⑤极地冰的作用；⑥冰盖和海平面上升。

(4)地球系统反馈机制——制约地球、海洋、大气和生命之间的活动过程。重点研究方向：①构造驱动反馈；②冰冻圈驱动反馈；③海洋天然气水合物和碳循环反馈；④生物驱动反馈；⑤由陆到海反馈；⑥潜在海底微生物反馈。

(5)地球历史的翻转点——通过研究地球地质历史阐明未来环境变化。重点研究方向：①地球气候系统的翻转点；②翻转点行为的驱动因素；③翻转点的尺度和速度；④结果和恢复。

(6)全球能量和物质循环——确定地球循环系统的作用、机制和重要性。重点研究方向：①地球是相互联系的储存系统；②能量循环；③物质循环：水；④物质循环：碳；⑤物质循环：金属。

(7)影响人类社会的自然灾害——理解海洋环境中的自然灾害。重点研究方向：①确定地质灾害的物理控制；②评估灾害周期；③在灾害记录中学习；④海底监控和观测。

3.1　持续发展、不断强化的重点战略目标

3.1.1　地球气候系统的作用与反馈

海洋占地球表面积的 71%，在气候系统中起着核心作用。深海岩心是最重要、分布最广泛、也是最连续的地球气候历史档案，只有通过大洋科学钻探才能获得。大洋科学钻探所取得的沉积物能重建生物圈、水圈、大气圈、冰圈以及固体地球等各个圈层之间关键的生物地球化学循环、通量和相互作用。这可以提高古气候重建的连续性、分辨率和准确性，建立能够更好地预测未来气候与环境变化的模型。IODP 科学计划(2013—2023 年)就此提出了“气候与海洋变化”的战略目标，重点关注地球气候系统对大气 CO_2 浓度增高的响应、冰盖和海平面对气候变暖的反应、降水分布的控制因素，以及大洋化学成分变动后的恢复机制等。面向2050 年科学框架强化了对地球气候系统的研究，将其作为“地球气候系统”和“地球系统反馈机制”两个战略目标，分别表述了地球气候系统的作用与反馈，研究冰盖、海洋和大气动力学以及海平面变化的规律，岩石圈和地幔、水圈、大气、冰冻圈和生物圈之间及其内部的相互作用，以及构造、冰冻圈、海洋资源等对气候的反馈。

3.1.2　地球生物圈与宜居性

地球是目前已知的唯一存在生命的行星。地球生物圈不仅分布在地球表层环境，还向下延伸至深海沉积物和岩石圈。深部生物圈是地球上活体生物总量的一个重要组成部分，大洋科学钻探为我们了解深部生物圈的起源、演化、生存环境、生物多样性和生物地球化学等方面的问题提供了可能性。对深部生物圈的起源和演化，微生物生长的机理，以及深海环境的改变如何影响微生物的总量等问题的理解，既可以使我们对地球古老生命的演化有更为深刻的认识，又可以为我们思考太阳系中其他星球可能存在的生命形式提供线索。IODP 科学计划(2013—2023 年)就此提出了“生物圈前沿”的战略目标，重点关注海底群落的起源和意义、海底深部的生命极限、生态系统和生物多样性对环境改变的敏感程度等。面向 2050 年科学框架将“地球上的生命和宜居性”摆在了七大战略目标的首位，不仅对深部生物圈的生命类型及其对地球的作用进行研究，还加强了地球宜居性的研究，为探索其他宜居星球提供线索。

3.1.3　板块的生命周期

由于地球内部热动力驱动了洋壳的形成、演化和消亡，每 2 亿年地球表面的 2/3 被重塑。这种行星尺度的演化推动了能量和物质的全球循环，调整了地球的环境条件，产生了关键的矿产资源，控制了对人类社会造成严重影响的自然灾害，并对生命体存在提供了关键支撑。形成与破坏大洋盆地，改变陆地位置，以及产生火山和地震的地球动力过程从地核延伸至大气层，对于理解行星演化范畴下的全球变化至关重要。IODP 科学计划(2013—2023 年)就此提出了“地球联系”的战略目标，重点关注地幔的组成结构与动力学、海底扩张和地幔熔融与洋壳结构的联系、洋壳与海水之间的交换、俯冲带的形成等。面向 2050 年科学框架提出了“板块的生命周期”的战略目标，重点研究海洋岩石圈的形成、年龄、运动和破坏，对大洋岩石圈演化整个生命周期进行研究，从初始洋壳到最成熟的、发生严重蚀变的洋壳，涵盖整个板块演化的完整序列。

3.1.4　影响人类社会的自然灾害

地球岩石圈的动力过程作用于广泛的时间和空间尺度上，从造成地震、滑坡与海啸发生的张力累积与释放，到海底沉积物与火成岩地壳中碳的循环与储存，以及热量、溶解物和微生物物质在海洋与海底之间的流通。地震、滑坡、海啸、火山爆发和

其他极端事件的破坏性影响对全球人类、工业和海洋基础设施构成直接威胁。大洋科学钻探能够提供研究地质灾害的位置要素，寻求有效降低其风险的科学认知，有助于评估和对比分析灾害发生前、中、后的联系。IODP 科学计划(2013—2023 年)就此提出了“活动的地球”的战略目标，重点关注破坏性地震、滑坡和海啸发生的控制机制等。面向 2050 年科学框架则加强了对海洋自然灾害的研究，提出了“影响人类社会的自然灾害”的战略目标，不仅要了解海底灾害，确定地质灾害的物理控制，还要评估灾害周期，对已有灾害进行深入研究，并对海底进行监控和观测。

3.1.5 能量和物质循环

物质和能量在不同储库之间的迁移，驱动了地球的长周期演化，也促成了新的海洋盆地扩张、造山和陆地风化剥蚀，不断塑造地球的表面。同时，还推动了大气和海洋的化学变化，控制了生命发展和进化的物理和化学条件，将地球气候从重大扰动中恢复过来，触发了威胁全球人类的灾害事件，以及聚集了包括淡水和重要金属在内的主要资源。大洋科学钻探能够确定地球系统中能量和物质的迁移模式、强度和速率。IODP 科学计划(2013—2023 年)并未单独就此提出战略目标，而是在地球联系和活动的地球中对此有所涉及。面向 2050 年科学框架单独提出了“全球能量和物质循环”的战略目标，要确定地球循环系统的作用、机制和重要性，理解地球是由相互联系的储库组成的，并且分别对能量和物质循环进行研究，物质循环中特别提到了水、碳和金属。

3.2 新增的重点战略目标

地球系统的许多组成部分均受翻转点的影响，当超过一个临界阈值，系统会进入一个新的状态。目前，我们对地球系统翻转点产生的原因和阈值的认识仍不充分，对达到和恢复阈值的过程和速率也知之甚少。大洋科学钻探通过从浅海陆架到深海大洋所有海洋盆地、多种构造环境的钻探获取沉积物和岩石，可以阐明翻转点的驱动和动力学机制，揭示局部和区域范围内的变化对全球系统的影响，定义地球系统翻转点的边界条件。为此，面向 2050 年科学框架提出了“地球历史的翻转点”的战略目标，通过研究地球历史阐明未来环境变化，确定地球其后系统的翻转点，研究翻转点的驱动因素、尺度和速率，以及其造成的结果和恢复等。

4 大洋科学钻探的特点与发展趋势

大洋科学钻探面向 2050 年的科学框架坚持开放获取样品和数据、数据标准化、自下而上提交方案、区域规划、通过钻探选址特性提高安全性和成功率、定期框架评估等原则。

(1)坚持解决重大科学问题。IODP 科学计划(2013—2023 年)聚焦气候与海洋变化、生物圈前沿、地球联系和活动的地球等 4 个重要主题，面向 2050 年科学框架关注地球上的生命和宜居性、板块的生命周期、地球气候系统、地球系统反馈机制、地球历史的翻转点、全球能量和物质循环以及影响人类社会的自然灾害等 7 个战略目标。探索地球系统是大洋科学钻探的永恒主题，面向 2050 年的科学框架重点强调地球系统的相互联系，通过关注全球自然灾害，着眼于全球海洋的健康和宜居性，将涵盖地球系统的基本组成部分，加深对动态地球、气候和环境以及生命之间众多而复杂的各种联系的理解。

(2)由地球拓展到太阳系。大洋科学钻探和大陆科学钻探的目标是紧密联系在一起的，通过两者协同，有望在人类所面临的几个挑战中取得重大科学突破，未来将强调通过从海洋盆地到大陆的横断面钻探，在近海和沿海地区实现从陆地到海洋的联合创新钻探活动。面向 2050 年的科学框架已不局限于地球，而是将探索研究范围拓展到太阳系。航天机构旨在加强对地球、太阳系和外层空间的认知。通过太空探索，人类渴望发现太阳系的基本物理规律，破译推动行星形成和演化所需要的条件，最终揭开太阳系和生命的起源。大洋科学钻探与航天机构合作，能够更好地理解行星演化并评估太阳系其他地方是否存在生命的可能性。

(3)重视技术和大数据。从海底获取样品和数据既是一项科学挑战，也是一项工程技术挑战。大洋科学钻探的持续成功需要钻井平台和取芯技术能够钻探获取高质量样品，实验室和井下仪器能够

对钻取的样品进行分析测试、原位测量、现场实验，基础设施能够存储、处理、分析和模拟所生成的大数据和资料。实现未来大洋科学钻探的宏大科学目标，必须依靠新技术研发和大数据分析技术。为了更加深入地钻探地球，实现在更极端的原位温度和压力下作业，需要技术创新开发新的钻探取心技术。大洋科学钻探产生大量岩心，其发展越来越依赖于数据编译、集成和分析，发掘数据的最大科技潜力，大数据分析至关重要。

(4)扩大社会影响和宣传。大洋科学钻探的核心目标是提高对地球系统如何影响人类社会的认识，这有助于了解自然灾害的性质、发生频率和潜在影响，找到缓解或解决办法。大洋科学钻探成果是帮助人类理解其对地球影响的有力来源，展示了人类社会对全球温度、侵蚀率、海洋酸化和生物多样性前所未有的影响。大洋科学钻探是国际合作的典范，研究人员跨越职业、跨越国家、跨越文化共同工作，实现共同的科学目标，并共享数据、岩心样品与研究成果。通过多种形式广泛迅速传播大洋科学钻探的成果，让科研人员、教育工作者和普通公众及时了解最新研究发现，传递科学信息，让大洋科学钻探成为有关海洋历史、地球系统及其与社会联系的主要可靠知识来源。

5　结语

大洋科学钻探顺利运行 50 余年，这对我国发起国际大科学计划提供了启示，具体如下。

(1)注重科技创新，运用大数据等先进技术。若想实现宏大的大科学计划目标，必须掌握先进的科学与技术。用科学理论确定目标，用先进技术研发卓越工具，用卓越工具获取数据资料，用大数据分析处理数据，验证科学假说，推动科学进步。形成大成果需要集大智慧，共享数据和样品有助于集成大成果。

(2)加强科学管理，促进开放和共享。大科学计划必然会产生大量的研究成果，对成果进行科学的管理和共享分配是大科学计划成功的重要标志。在大科学计划实施的后期成果管理中，应该细化成果的管理和共享管理机制，明确成果权属，利用多形式、多类别的推广方式对可公开数据进行发布，整体提升科学计划对解决世界性重大科学难题的贡献。

(3)重视提升影响力，扩大宣传和影响。让科研人员参与大科学计划，通过多种形式的宣传号召跨学科、跨领域的学者加入，运用交叉学科切实解决实际问题；让教育工作者知晓大科学计划，激发学生探索地球的兴趣，提升大科学计划在学生心中的地位，培养下一代大科学家；让社会公众了解大科学计划，明白其目标和意义，使公众真正关心的问题与需求得到响应，提升公众对大科学计划的支持程度。

参考文献(References)：

[1] 中国大洋发现计划办公室，海洋地质国家重点实验室(同济大学). 大洋钻探五十年[M]. 上海：同济大学出版社，2018.
IODP-China office, State Key Laboratory of Marine Geology (TongJi University). Fifty years of scientific ocean drilling [M]. Shanghai: TongJi University Press, 2018.

[2] 拓守廷，翦知湣. 科学大洋钻探船的回顾与展望[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程，2016，8(2)：155－161.
TUO Shouting, JIAN Zhimin. Scientific ocean drilling vessels: review and prospect[J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 155－161.

[3] KOPPERS A P, COGGON R, BURBERRY C, et al. Exploring earth by Scientific Ocean Drilling: 2050 science framework[EB/OL].(2020－10－27)[2023－02－16]. https://doi.org/10.6075/J0W66J9H

[4] 刘文浩，郑军卫，赵纪东，等. 大洋钻探计划管理机制及启示[J]. 世界科技研究与发展，2019，41(1)：77－87.
LIU Wenhao, ZHENG Junwei, ZHAO Jidong, et al. Management mechanism and enlightenment and Ocean Drilling Programs[J]. World Sci-Tech R & D, 2019, 41(1): 77－87.

[5] 汪品先. 大洋钻探五十年：回顾与前瞻[J]. 科学通报. 2018，63(36)：3868－3876.
WANG Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect[J]. Chinese Science Bulletin. 2018, 63(36): 3868－3876.

[6] 中国大洋钻探学术委员会. 中国加入综合大洋钻探(IODP)科学计划(2003—2013)[J]. 地球科学进展，2003(5)：662－665.
Science Committee of ODP-China. Chinese national science plan (2003－2013) for participation in IODP[J]. Advances in Earth Science, 2003(5): 662－665.

[7] 中国大洋发现计划[J]. 地球科学进展，2020，35(11)：1098－1211.

IODP－China[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(11): 1098－1211.

[8] 汪品先. 未雨绸缪:迎接大洋钻探学术新计划的制定[J]. 地球科学进展,2017, 32(12): 1229－1235.
WANG Pinxian. Towards the new decade of ocean drilling: Preparing its science plan[J]. Advances in Earth Science, 2017,32(12) : 1229－1235.

[9] 翦知湣. 进军深海科学前沿:我国参与大洋钻探的进展[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3877－3882.
JIAN Zhimin. Towards the scientific frontier of deep-sea research-Progress of China's participation in ocean drilling[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36): 3877－3882.

[10] 丁仲礼. 中国大洋钻探二十年[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3866－3867.
DING Zhongli. Twenty years of scientific ocean drilling in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36): 3866－3867.

[11] 刘志飞,拓守廷. 科学大洋钻探回顾与展望[J]. 自然杂志, 2007(3): 141－151.
LIU Zhifei, TUO Shouting. Scientific Ocean Drilling Programs: Review and prospect[J]. Chinese Journal of Nature, 2007(3): 141－151.

[12] 《大洋钻探—探索地球》:面向 2050 大洋钻探科学框架发布[J]. 地质装备. 2021, 22(1): 7－8.
"Expedition statistics exploring earth by Scientific Ocean Drilling: 2050 science framework" was released [J]. Equipment for Geotechnical Engineering. 2021, 22(1): 7－8.

[13] IODP. Combined IODP, ODP, & DSDP drill sites [EB/OL]. [2022－06－17]. http://iodp.tamu.edu/scienceops/maps/iodp_odp_dsdp.pdf.

[14] IODP. Expedition Statistics [EB/OL]. (2022－04) [2023－2－16]. https://www.iodp.org/expeditions/expedition－statistics.

[15] 金性春,周祖翼,汪品先. 大洋钻探与中国地球科学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995.
JIN Xingchun, ZHOU Zuyi, WANG Pinxian. Ocean Drilling Program and earth science in China[M]. Shanghai: TongJi University Press, 1995.

[16] 宁伏龙. 大洋科学钻探:从 DSDP－ODP－IODP[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
NING Fulong. Scientific ocean drilling: from DSDP to ODP to IODP [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009.

[17] 同济大学海洋地质教育部重点实验室. 地球、海洋与生命: IODP 初始科学计划 2003－2013[M]. 上海:同济大学出版社, 2003.
Laboratory of Marine Geology, Tongji University. Earth ocean and life: IODP initial science plan 2003－2013[M]. Shanghai: TongJi University Press, 2003.

[18] 柴育成,周祖翼. 科学大洋钻探:成就与展望[J]. 地球科学进展,2003(5): 666－672.
CHAI Yucheng, ZHOU Zuyi. Scientific ocean drilling: achievements and prospects[J]. Advances in Earth Science, 2003(5): 666－672.

[19] 中国综合大洋钻探计划办公室. 照亮地球:过去、现在与未来[M].上海: 同济大学出版社, 2013.
IODP－China office. Illuminating Earth's Past, Present, and Future[M]. Shanghai: TongJi University Press, 2013.

[20] 赵义,蔡家品,阮海龙,等. 大洋科学钻探船综述[J]. 地质装备, 2019, 20(3): 11－14.
ZHAO Yi, CAI Jiapin, RUAN Hailong, et al. Summary of scientific ocean drilling[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019, 20(3): 11－14.