

PROMOTING INTERNATIONAL
SCIENTIFIC OCEAN DRILLING
PROMOTING INTERNATIONAL
SCIENTIFIC OCEAN DRILLING
PROMOTING INTERNATIONAL
SCIENTIFIC OCEAN DRILLING



面向2023年后

大洋钻探学术研讨会

PROMISING Workshop

会议手册

H A N D B O O K



中国大洋发现计划专家咨询委员会
IODP-China Scientific
Committee



国家自然科学基金委员会地球科学部
Earth Science Department of National
Natural Science Foundation of China



海洋地质国家重点实验室, 同济大学
State Key Laboratory of
Marine Geology, Tongji University

面向2023年后
大洋钻探学术研讨会

PROMISING Workshop

PROMOTING INTERNATIONAL SCIENTIFIC
OCEAN DRILLING

2019年8月15~16日 • 上海

会议组织机构

学术委员会

主 任 丁仲礼

副主任 陈 骏、朱伟林、翦知湑

委 员 汪品先、金振民、王成善、李家彪、丁抗、李铁刚、刘羽、庞雄、
丘学林、邵宗泽、石学法、孙卫东、王风平、徐景平、杨胜雄、
张海啟、周力平

主办单位

中国大洋发现计划专家咨询委员会

国家自然科学基金委员会地球科学部

同济大学海洋地质国家重点实验室

会议专题

围绕国际大洋发现计划的科学主题和我国大洋钻探发展战略，本次会议设置以下五个专题：

专题一	气候与环境演变	召集人：田 军、柳中晖
专题二	构造与地球动力学	召集人：孙 珍、丁巍伟
专题三	岩石圈与深部	召集人：周怀阳、张国良
专题四	生物圈前沿	召集人：王风平、张传伦
专题五	平台运行与组织管理	召集人：杨胜雄、翦知湣

会议秘书处

拓守廷 会务协调

 021-65982198, 13601872997  iodp_china@tongji.edu.cn

高小丰 会议注册

 021-65981613, 15021055616  gaoxiaofeng@tongji.edu.cn

刘志飞 学术日程

 021-65984877, 13816101893  lzhifei@tongji.edu.cn

联系地址 中国 IODP 办公室，同济大学海洋地质国家重点实验室

上海市四平路 1239 号（邮编 200092）

会议网站 <http://www.iodp-china.org/beyond2023>

目 录

会议基本信息	1
会议注册	1
会议地点	1
会议就餐	1
口头报告	1
交通指南	1
会场、酒店及交通枢纽位置图	3
会议日程安排	4
会议阅读材料	8
IODP Science Plan Structure and Roadmap	8
参会人员问卷调查材料综述	18
气候与环境演变综述	24
构造与地球动力学综述	38
岩石圈与深部综述	45
生物圈前沿综述	51
国际大洋发现计划的组织管理与运行	57
中国大洋钻探二十年 - 丁仲礼	63
大洋钻探五十年: 回顾与前瞻 - 汪品先	65
进军深海科学前沿—我国参与大洋钻探的进展 - 翦知潜	74

会议基本信息

会议注册

8月14日 14:00~20:00 在同济君禧大酒店三楼二号会议室注册报到，
领取会议材料。

8月15日 08:00~16:00 在同济大学逸夫楼注册报到，领取会议材料。

会议住宿

已通过会议网站和会议秘书处预订房间的参会代表请直接到酒店前台登记入住，
住宿费用与酒店结算。未预订房间的参会代表建议提前通过携程等网站预订会场
周边酒店，会议不承担现场预订宾馆工作。

会议地点

会议地点在同济大学逸夫楼（上海市杨浦区四平路 1239 号）。

主会场设在一楼报告厅（8月16日下午为二楼报告厅），

分会场设在逸夫楼二楼报告厅、逸夫楼一楼会议室、113 会议室和 103 会议室。

会议就餐

会议安排了工作餐，其中 8 月 15~16 日午餐安排在同济大学学苑餐厅二楼，

8 月 15 日晚餐安排在同济大学三好坞餐厅二楼。

会议用餐均凭有效餐券就餐（现场注册时领取），请按照餐券上标识的时间地点
就餐。由于就餐时间集中，预计将出现排队情况，请大家谅解和配合。

口头报告提醒

大会报告和专题发言请提前将 PPT 文件拷贝至会场专用计算机

(14 日可在注册处拷贝, 15、16 日请直接至分会场拷贝)。

交通指南

会场及会议建议宾馆周边交通较为方便, 从虹桥国际机场、浦东国际机场、上海火车站、上海南站等交通枢纽均有多种交通方式到达, 具体请参考附图。



会场、酒店及交通枢纽位置图



会议日程安排

同济大学 逸夫楼 • 上海

8 月 15 日 上午

- 08:30-12:00 大会报告 主持人：王成善（逸夫楼一楼报告厅）
- 08:30-08:45 领导致词
- 08:45-09:05 **翦知湑** 中国 IODP “三步走” 之第二步
- 09:05-09:25 **周怀阳** 2023 年后国际大洋科学钻探计划制定进展介绍
- 09:25-09:45 **Beth Christensen** Roadmap to 2050: NEXT and Beyond, the US perspective
- 09:45-10:05 **Kiyoshi Suyehiro** 关于 IODP 未来计划的讨论进展——来自 J-DESC 和 JAMSTEC 的报告
- 10:05-10:25 茶歇
- 10:25-10:45 **Leanne Armand** ANZIC' s Ocean Planet workshop outcomes and input to the future IODP science plan
- 10:45-11:00 **孙 珍** 西太平洋边缘海地球动力学关键科学问题、大洋钻探与国际合作
- 11:00-11:15 **黄恩清** 气候演变的低纬驱动
- 11:15-11:30 **黄奇瑜** 花东海盆大洋钻探科学目标
- 11:30-11:45 **刘志飞** 巽他陆架大洋钻探建议进展
- 11:45-12:00 **刘家瑄** 准备与提出大洋钻探计划书:台湾在 ODP 时代的经验谈

8 月 15 日 下午

13:30-17:00 专题会议（分四个会场）

专题一：气候与环境演变 召集人：田军、柳中晖 （二楼报告厅）

引领性发言（每个发言 15-20 分钟）：

柳中晖 过去海洋环流变化的重建及其对全球气候的响应

万世明 构造驱动下的第四纪中国东部边缘海古环境演化

郑旭峰 多个维度北太平洋洋流“模态”重建及其气候意义

李永祥 白垩纪大洋缺氧事件：研究进展与展望

张虎才 南亚季风系统与东亚季风、南部非洲季风的相互作用

专题讨论

专题二：构造与地球动力学 召集人：孙珍、丁巍伟 （一楼会议室）

引领性发言（每个发言 15-20 分钟）：

丁巍伟 IODP 在构造与地球动力学领域的重大进展及对中国未来钻探的启示

孙 珍 被动陆缘和边缘海张裂-破裂-扩张过程研究进展及未来钻探研究方向

李三忠 微板块构造—板块驱动力问题与未来大洋钻探思考

专题讨论

专题三：岩石圈与深部 召集人：周怀阳、张国良 （113 会议室）

引领性发言（每个发言 15-20 分钟）：

陈立辉 深部地幔的物质组成与动力学——来自大洋板内玄武岩的视角

黄 方 大洋钻探与洋底高原和大火成岩省成因

李洪颜 大洋钻探与板块起始俯冲研究进展与展望

周怀阳 大洋钻探 50 年岩石圈研究主要成就概略与展望

张国良 大洋钻探揭示地幔组成演化和深部碳循环

专题讨论

专题四：生物圈前沿 **召集人：王风平、张传伦** (103 会议室)

引领性发言 (每个发言 15-20 分钟):

王风平 深部生物圈研究的下一个突破口在哪里?

李江涛 大洋岩石圈“深部生物圈”的研究进展与挑战

刘常宏 洋（海）底深部沉积环境真菌的研究进展、问题及建议

黄 力 深海病毒及其生态学功能

贾国东 IODP 生物圈前沿: 有机地球化学进展与展望

专题讨论

8 月 16 日 上午

08:30-10:00 大会讨论 主持人：周力平（逸夫楼一楼报告厅）

专题会议讨论结果汇报（四个专题，每个 20 分钟，由专题召集人汇报）

大会讨论

8月16日 上午

10:30-12:00 专题会议（逸夫楼一楼报告厅）

专题五：平台运行与组织管理 **召集人：杨胜雄、翦知湑**

引领性发言（每个发言 15-20 分钟）：

拓守廷 IODP 现有平台运行和管理

尉建功 中国大洋钻探平台运行与组织管理

肖楠 日本高知 IODP 岩芯中心介绍

张建松 参加大洋钻探科普教育的实践与启示

专题讨论

8月16日 下午

13:30-16:00 大会讨论 主持人：朱伟林（逸夫楼二楼报告厅）

13:30-13:50 **Jamie Austin** Scientific Ocean Drilling – A Successful
Past and Present, A Personal Look Beyond 2023

13:50-14:50 未来展望：青年科学家发言（6 个报告，每个 10'）

14:50-15:30 专题发言

15:30-16:00 **汪品先** 大洋钻探和中国地球科学的未来

16:00 会议结束

Scientific Ocean Drilling Beyond 2023

NEW SCIENCE PLAN STRUCTURE and ROADMAP **DRAFT**

July 23-24, 2019

Columbia University, New York, USA

Scientific Ocean Drilling Beyond 2023

Science Plan Working Group

Columbia University, New York, U.S.A.

July 23-24, 2019

Delegates (18)

Anthony Koppers (Chair)	Oregon State University	U.S.
Cristiano Chiessi	University of São Paulo	Brazil
Gail Christeson	University of Texas at Austin	U.S.
Mike Coffin	University of Tasmania	Australia (ANZIC)
Rosalind Coggon	University of Southampton	U.K. (ECORD)
Stuart Henrys	GNS Science	N.Z. (ANZIC)
Yoon-Mi Kim (<i>in absentia</i>)	KIGAM	Korea
Iona McIntosh	JAMSTEC	Japan
Katsuyoshi Michibayashi	Nagoya University	Japan
Yuki Morono	KCC, JAMSTEC	Japan
Antony Morris	University of Plymouth	U.K. (ECORD)
Richard Norris	Scripps Inst. of Oceanography	U.S.
Matt O'Regan	Stockholm University	Sweden (ECORD)
Anais Pages	CSIRO	Australia (ANZIC)
Dhananjai Pandey	NCPOR	India
Sandra Passchier	Montclair State University	U.S.
Zhen Sun	S. China Sea Inst. of Oceanology	China
Huaiyang Zhou	Tongji University	China

Others (7)

Jamie Allan	National Science Foundation	NSF IODP
Carl Brenner	Lamont-Doherty Earth Obs.	USSSP
Beth Christensen	Rowan University	U.S.
Dick Kroon	University of Edinburgh	IODP Forum Chair
Maureen Raymo	Lamont-Doherty Earth Obs.	USSSP
Sanny Saito	MarE ³ , JAMSTEC	J-DESC
Angela Slagle	Lamont-Doherty Earth Obs.	USSSP

PREAMBLE ON PLANNING PROCESS

Six international planning workshops were organized in September 2018, and April-May and August 2019 by IODP-India, J-DESC, ECORD, ANZIC, USSSP, and IODP-China. More than 650 scientific ocean drilling scientists participated, including 32% female and 36% early- to mid-career scientists. The results from those workshops were presented and discussed on July 23-24 during the first meeting of the *Science Plan Working Group* at Columbia University. In this document, the 18 scientist delegates, representing all IODP member countries and consortia, including IODP-Brazil and IODP-Korea (*in absentia*), are providing a consensus proposal for a new science plan structure in support of future *Scientific Ocean Drilling Beyond 2023*. This proposal, also including a roadmap toward publication of the new science plan by June 2020, will be presented to the IODP Forum during its September 2019 meeting in Osaka, Japan.

PROPOSED PLAN FOR SCIENTIFIC OCEAN DRILLING BEYOND 2023

The new science plan for scientific ocean drilling beyond 2023 is structured around **Eight Strategic Objectives** that are based on current knowledge and priorities, and are crafted to be open-ended in order to accommodate and encourage new discoveries and innovations. These strategic objectives emphasize interconnected research questions by focusing on understanding Earth's ***Natural Hazards, Cycles and Rates, and Health and Habitability***, each of which cuts across, or has natural pathways, among the general research topics related to ***Dynamic Earth, Climate and Environment, and Life***.

The new plan has a long-term, greater than 25-year outlook, ending in 2050. This allows the scientific community to apply exciting new foundational approaches that range our research efforts far into the mid-21st century, via the implementation of **Five Long-term Flagship Initiatives** that reflect community priorities expressed through the international planning meetings. These flagship initiatives are based on interdisciplinary research that may reach across several strategic objectives, span multiple expeditions over potentially multi-decadal time periods, and include collaborations with external partner organizations. These initiatives address the eight strategic objectives that form the core of the science plan and are expected to evolve through bottom-up proposal submission and periodic community review between now and 2050.

Progress toward the new science plan will be assessed with a five-year programmatic review cycle. This allows for intermediate adjustments or additions to the strategic objectives and flagship initiatives.

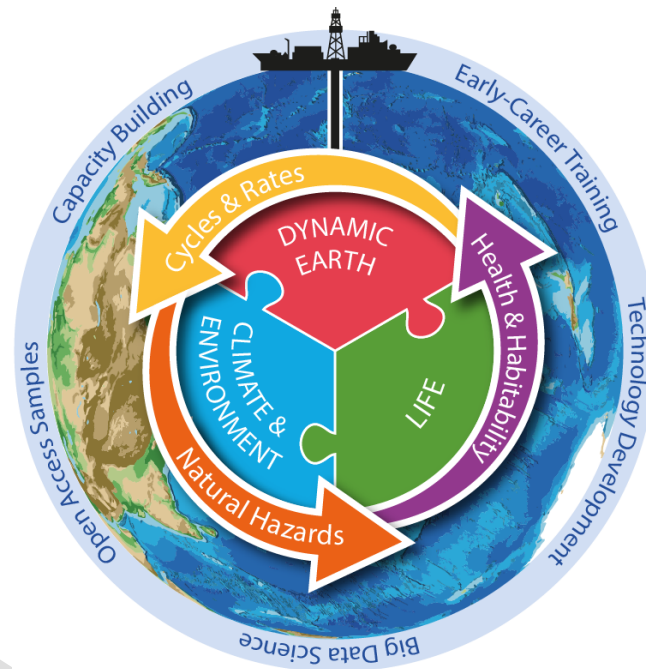
A. SCIENCE PLAN TITLE AND VISION STATEMENT

EXPLORING EARTH BY SCIENTIFIC OCEAN DRILLING

To explore Earth system processes and feedbacks through geological time with scientific ocean drilling.

B. WHO WE ARE AND WHAT WE DO

- We are an international scientific community pioneering large-scale, interdisciplinary research in the subseafloor of the world's oceans.
- We explore Earth systems in places that can only be accessed and understood through scientific ocean drilling.
- We probe past time to reveal the interactions among the oceans, Earth, life, climate, and society.



C. OVERALL STRUCTURE

Scientific ocean drilling through 2050 centers around eight **Strategic Objectives** that aim to advance our understanding of Earth as an interconnected system. In this structure five **Flagship Initiatives** provide longer-term endeavors to attain fundamental progress in those strategic objective areas that require a sustained, multi-faceted, and global effort. Successes in future scientific ocean drilling are strongly intertwined with communicating our results to the public and policy makers, capacity building within the international scientific community, training the next generation, access to big data science, open access to samples and data, and new developments in technology. This new structure will demand an even stronger interdisciplinarity in scientific ocean drilling. It also shows how our science informs society, while addressing foundational Earth system research questions.

D. STRATEGIC OBJECTIVES

A strategic objective emphasizes interconnected research linking science disciplines to address societally critical paradigms. These strategic objectives will apply scientific ocean drilling to make new discoveries and deepen our understanding of Earth's **Natural Hazards, Cycles and Rates, and Health and Habitability**, each of which can only be addressed by researching the cross-cutting pathways among the broad research areas of the **Dynamic Earth, Climate and Environment, and Life**.

The eight strategic objectives thus form the core of scientific ocean drilling through 2050. Each objective is described below with example research topics that resonated across all six international planning meetings. Each objective has been designed to be open-ended, to encourage new discoveries and innovations, and allow new Earth system science to emerge through the proposal writing and review process.

- 111 • **Define the conditions for life and Earth habitability**
- 112 – How organisms live, interact, and die beneath the seafloor
- 113 – How microbes interact with lithology and fluids
- 114 – Rules of life and how these both govern and are affected by Earth processes
- 115 • **Constrain the feedbacks among oceans, Earth, life, and climate**
- 116 – Feedbacks among life, the rock cycle, crustal properties, and mantle dynamics
- 117 – Active tectonics and their impact on oceanic and atmospheric circulation and chemistry
- 118 – Solar, climate, and tectonic factors that govern ocean productivity
- 119 – How subseafloor life and Earth's environment shape the cycling of energy and mass
- 120 • **Examine the cryosphere and sea level under different climate states**
- 121 – How mechanisms and rates of sea level change vary through time
- 122 – Feedbacks that lead to ice sheet growth and deglaciation
- 123 – Evolution of polar land and ocean systems under different climate states
- 124 – How the overall cryosphere, including sea ice, permafrost and marine gas hydrates,
- 125 responded to climate change in the past
- 126 • **Use the past to inform our understanding of Earth's projected future**
- 127 – Ocean productivity and ecosystem dynamics in the greenhouse worlds
- 128 – The climatic, biological, and chemical characteristics of an ice-free planet
- 129 – Record and magnitude of human impacts in Earth systems
- 130 – Evolution of ocean health over geologic time in the lead up to the Anthropocene
- 131 • **Identify the causes, scales, and consequences of climatic and environmental**
- 132 **perturbations**
- 133 – Timescales and patterns of ecosystem recovery after major disturbances
- 134 – Effects of catastrophic environmental perturbations that shaped the history of life
- 135 – Formation of large igneous provinces and their environmental and biosphere impacts
- 136 – Evolution of rainfall and aridity patterns as a function of tectonics
- 137 – Climate teleconnections between the poles and tropics
- 138 – Consequences of reaching different tipping points in the climate system
- 139 • **Investigate the life cycle of a lithospheric plate and its impact on the Earth system**
- 140 – Causes and processes of plate boundary formation (including rift zones, ridge systems,
- 141 transform faults, subduction zones, passive margins) and implications for geohazards
- 142 – Impact of spreading rate, tectonic setting, and geologic aging on lithosphere architecture
- 143 – Hydrothermal and microbiological interactions among plates and the mantle, oceans, and
- 144 atmosphere, with impacts on geochemical cycles, resources, and life
- 145 – Controls on the biogeography of microbial communities within the oceanic crust
- 146 – Mechanisms of back-arc formation, ophiolite emplacement, and continental growth

147 • **Characterize the transfer of water, energy and matter in the Earth system**

- 148 – Processes that influence the occurrence and magnitude of volcanism
- 149 – Impacts of geomagnetic reversals and secular variations on the Earth system
- 150 – Evolution of subsurface fluids and influences on life, climate, and geochemical cycles
- 151 – Deep carbon storage in the seafloor and mantle

152 • **Assess the conditions and processes that control the occurrence of natural hazards**
153 **that affect society**

- 154 – Rates and amplitudes of natural disasters in the past
- 155 – Impacts of natural hazards on the climate and environment, including tsunamis, hydrate destabilization, and storm surges
- 156 – Feedbacks among sea level, climate, volcanism, and tectonics
- 157 – Physical processes controlling slip behavior at the subduction interface
- 158 – Improving hazard assessment guided by monitoring

160 **E. FLAGSHIP INITIATIVES**

161 The next scientific ocean drilling science plan will have a distant time horizon in the mid-
162 21st century to allow for the implementation of flagship initiatives requiring sustained,
163 long-term research efforts. These flagship initiatives are expected to comprise multi-
164 expedition foundational scientific ocean drilling endeavors that cross-cut multiple
165 strategic objectives and require interdisciplinary efforts over 10-20-year time periods.
166 These flagship initiatives may in particular help address societal challenges.

167 • **Ground-truthing Future Climate Change**

168 Climate change is one of the greatest challenges confronting modern society. State-of-the-
169 art computer models allow future climate projection, but these models are imperfect and
170 require independent validation. Climate records from across the globe, capturing recent
171 and deep geological time, are essential to understand the feedbacks that operate in both
172 warmer and colder climate states than present. This information is needed to test, train,
173 and improve global climate models, the outputs of which guide international agreements
174 on tackling climate change. Scientific ocean drilling is uniquely positioned to provide
175 these critical ground-truthing data sets over the next decades. A sustained coordinated
176 approach aimed at collecting high-resolution, complete-recovery cores along transects
177 and grids will be required. North-south transects across the ocean basins, from the poles
178 to the tropics, and high-density grids in the polar regions, will provide a fundamental
179 contribution in positioning society for future climate change.

180 • **Probing the Deep Earth**

181 The quest to achieve a complete penetration of Earth's oceanic crust has been a long-term
182 aspiration and compelling motivation for scientific ocean drilling, but has been
183 challenging and elusive due to technological limitations and long-range scheduling
184 constraints. Deep drilling is required to understand the formation and evolution of two-

thirds of our planet's surface, the fundamental nature of Earth's deep interior and its geodynamic behaviour, and the interrelationships between geological, biogeochemical and climate cycles in the wider Earth system. The greater than 25-year outlook of the new science plan will allow the scientific ocean drilling community to adopt a staged approach to reaching the Earth's upper mantle, via a series of interconnected, ambitious expeditions that will take full advantage of emerging 21st century drilling technologies.

• Diagnosing Ocean Health

Through scientific ocean drilling, we can explore past interactions between life and Earth's environment leading up to the Anthropocene. The health of our oceans is currently seeing growing impacts of long-lasting human-made materials, gases, and industrial pollutants that contribute to anthropogenic climate change, global ocean acidification, and the expansion of oxygen minimum and dead zones. Still, very little is known about the impact of these contaminants on our oceans and its ecosystem. Geologically-induced perturbations, such as past global warming and cooling, increased global volcanism, oceanic anoxic events, meteorite impacts, and mass extinction events, provide vital instances in the history of our planet when the entire interconnected system of the oceans, Earth, and life underwent a significant readjustment. A concerted effort in future scientific ocean drilling should provide access to comprehensive marine records that contain the pre-Anthropocene baselines and analogs to ocean acidification, deoxygenation, nutrient inputs, and rapid temperature change that could be used to inform the impact of today's ongoing environmental changes and perturbations.

• Exploring Life and Its Origin

Scientific ocean drilling has revealed that microbial organisms are present and metabolically-active at kilometers depths in both sediment and ocean crust. Deep biosphere research on these newly discovered lines of Archaea, Bacteria, Eukarya, and viruses remains in its infancy, and most of the deep, hot biosphere is yet to be explored and understood. Scientific ocean drilling through 2050 will allow us to capitalize on new and emerging techniques in this rapidly developing field to explore the fundamentals of life, and its persistence, resilience, interactions and diversity through time. A systematic study of life in the subseafloor throughout the world's ocean basins can provide a powerful approach to unraveling species origin, evolution and extinction, to understanding life on the early Earth, and to characterizing and searching for habitable environments in the universe.

• Assessing Earthquake Hazards to Society

The most catastrophic event in recent history was the magnitude 9.1 Sumatra 2004 Boxing Day earthquake and tsunami that killed more than 230,000 people. Natural hazards, including such mega-scale earthquakes, are prominent targets for scientific ocean drilling, because it remains the only tool capable of directly accessing the source regions of these devastating sub-seafloor events. Revolutions in instrument development are enabling us to detect and monitor such natural hazards in novel ways and ever-greater detail. The time is ripe for ambitious, long-term drilling strategies to investigate seismic slip in a range of global fault environments, and through complete earthquake cycles, in order to aid future earthquake and tsunami risk assessments and projections.

226 F. RELATION TO ALLIED PROGRAMS

227 The strategic objectives and flagship initiatives that underpin scientific ocean drilling
228 through 2050 aim to study Earth as an integrated and interconnected system of processes
229 and feedbacks. The science priorities laid out in this new science plan strongly align and
230 complement research initiatives in allied research programs, such as the International
231 Continental Scientific Drilling Program (ICDP) and the National Aeronautics and Space
232 Administration (NASA) and other space agencies around the world (ESA, JAXA, CNSA,
233 ISRO, ASA). The strong alignment is evident in the five science themes of the ICDP
234 science plan that includes *Active Faults and Earthquakes*, *Heat and Mass Transfer*,
235 *Global Cycles and Environmental Change*, the *Hidden Biosphere*, and *Cataclysmic*
236 *Events*, and, for example, is expressed under NASA's Strategic Objective 1.1 *Under-*
237 *stand the Sun, Earth, Solar System, and Universe* that includes the goal of *Searching*
238 *for Life Elsewhere*. Within the new era of scientific ocean drilling we will capitalize on
239 new opportunities afforded by parallel coordinated research efforts within ICDP and the
240 various national space agencies. This will allow for critical new science growth in those
241 overlapping research areas.

242 G. BIG DATA SCIENCE

243 Progress toward addressing the eight strategic objectives and the five flagship initiatives
244 increasingly and critically depends on the integration of data sciences using so-called *Big*
245 *Data* in scientific ocean drilling. For example, ground-truthing future climate change
246 based on IPCC climate projections will require data aggregation from hundreds of
247 globally-distributed sites acquired over many scientific ocean drilling expeditions. These
248 analyses are unique, as only scientific ocean drilling is able to acquire data covering
249 large-scale geographic areas with information going back deep into geological time,
250 providing comprehensive baseline data from time intervals under various global climate
251 states. In a similar fashion, exploring life and its origin on Earth would require the
252 building of a subseafloor microbial databank to allow for methodical progress in this
253 flagship initiative. By focusing on FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)
254 data practices, scientific ocean drilling will allow scientists to focus on the linkages
255 among data types that are critical for meeting our future strategic objectives.

256 H. TECHNOLOGY, MONITORING AND OBSERVATORIES

257 Future developments in technology, monitoring, and observatory science will underpin
258 our ability to achieve the core strategic objectives and implementing the flagship
259 initiatives. For example, downhole instrumentation enables studies and monitoring of the
260 earthquake cycle in locations only accessible through ocean drilling. In addition, deep
261 biosphere exploration, and the discovery of life and its diversity, is only made possible by
262 ongoing technological developments. Over the next decades, progress in scientific ocean
263 drilling will continue to be uniquely driven by new technology developments.

264 I. SOCIETAL RELEVANCE AND OUTREACH

265 Societal relevance is integral to all scientific ocean drilling. This is strongly apparent in
 266 the five flagship initiatives that are built upon the eight strategic objectives in the new
 267 science plan. Natural hazards, and the health and habitability of Earth and its oceans, are
 268 cross-cutting themes central to the well-being of global society. For example, ground-
 269 truthing future climate change will provide critical information to all coastal communities
 270 threatened by a projected average sea level rise of one or more meters over the next few
 271 decades. Studies in aridity, rain, and storm patterns; the hazards resulting from tsunamis,
 272 landslides, and earthquakes; and the origin and sustainability of life on our planet, all
 273 contribute to prediction and risk assessment of future impacts on society, as well as a
 274 more profound basic understanding of the Earth system.

275 It will be critical to convey the wealth of information gained through scientific ocean
 276 drilling to the public across the globe. Outreach and public engagement through
 277 consistent media presence, reaching and engaging a broader audience, will need to
 278 capitalize on the extraordinary scientific ocean drilling expeditions and initiatives. The
 279 scientific ocean drilling community must remain deeply dedicated to increasing public
 280 awareness and understanding of the Earth we all inhabit.

281 PROPOSED ROADMAP UNTIL JUNE 2020

282 The new science plan in support of scientific ocean drilling through 2050 is proposed to
 283 be published by **June 2020** based on agreement amongst the 18 international delegates of
 284 this Science Planning Working Group. This early publication date will allow IODP
 285 partners to start planning for future platform replacements.

286 A. PRODUCTS

- 287 • **Full Version of International Science Plan:** ~60-70-page document, including an executive
 288 summary, written for the overall scientific ocean drilling community.
- 289 • **Summary of International Science Plan:** ~12-page document, written in layman's language
 290 for society at large.
- 291 • **Pamphlet of International Science Plan:** 2-page document, written in language appropriate
 292 for funding agencies.
- 293 • **National Science Plan Versions, Executive Summaries and Pamphlets:** depending on
 294 needs, individual Program Member Offices (PMOs) may opt to produce translated versions
 295 of the international science plan, executive summary, and pamphlet, and create derived
 296 variations tailored to demands in their countries and consortia.

297 **B. TIMELINE AND DEADLINES**

DEADLINE	ACTION	DETAILS
11 Sept 2019	IODP Forum discusses new science plan proposal	• Forum endorses new science plan structure and roadmap • Forum selects science plan writing team lead editor(s), number of writers, writer profiles, charge • Forum endorses print/online versions to be produced
16 Sept 2019	Invitations go out to writing team	• Science plan writers accept by 26 Sept 2019
30 Sept 2019	First Zoom meeting with science plan writing team	• Laying out charge to science plan writing team • Assignments for writing chapters
1 Nov 2019	First internal draft due for review by science plan working group	
1 Dec 2019	Second internal draft due for review by science plan working group	
8 Dec 2019	Pre-AGU meeting for science plan working group and writing team	
11 Dec 2019	AGU Townhall	• Presentation of new science plan structure and roadmap • Introduction science plan working group and writing team • Q&A session on scientific ocean drilling beyond 2023
15 Jan 2020	Final internal draft due	
22 Jan 2020	Posting public draft version 1 online at IODP.org	• Community gets 3 weeks for commenting • Science plan writing team gets 3 weeks for updating the science plan documents
4 Mar 2020	Posting public draft version 2 online at IODP.org	• Community gets 2 weeks for commenting • A group of external reviewers gets 2 weeks for reviewing • Science plan writing team gets 3 weeks for updating the science plan documents
15 Apr 2020	Final version presented to science plan working group and Forum for endorsement	
30 Apr 2020	Final version to be sent to printer	
June 2020	Publication of new science plan	

298 **C. SCIENCE PLAN WRITING TEAM**

- 299 • **11 Writers:** we will invite in total eight writers, who will together work in teams of two on
300 two related strategic objectives, and on one or more flagship initiatives; we will invite three
301 additional writers who will focus on the remaining chapters; each writer will get assigned a
302 primary chapter and will act as a secondary author on one or more other chapters.
303 • **2 Lead Editors:** the science plan writing team will be led and coordinated by a lead editor
304 and a deputy lead editor.

305 **Charge:** the science plan writing team will fill in the science plan structure, but leave the
306 intent of the strategic objectives and flagship initiatives intact. They will write toward a

broad audience resulting in mostly jargon-free chapters that will elevate the excitement in our new approaches. They also will emphasize where we have excelled in the past by addressing key science successes and the advances that can be made by new science priorities. They will work together with professional science writers and illustrators.

D. SCIENCE PLAN WORKING GROUP

• **18 Delegates:** these delegates represent all IODP member countries and consortia.

Charge: the science plan working group has four tasks: providing guidance to the writers as guardians of the science plan vision; reviewing the science plan (drafts); endorsing in conjunction with the IODP Forum the final science plan draft; and acting as liaisons with the IODP science community in their PMO countries and consortia.

Note: there will be some overlap in the working and writing groups. The chair of the working group also functions as the lead editor of the writing group; the deputy lead editor also is a delegate of the working group; and some of the other delegates may be invited as science plan writers. This provides efficiencies in communication between both groups, required because of the contracted time line ending in June 2020.

E. REVIEW AND COMMENTING

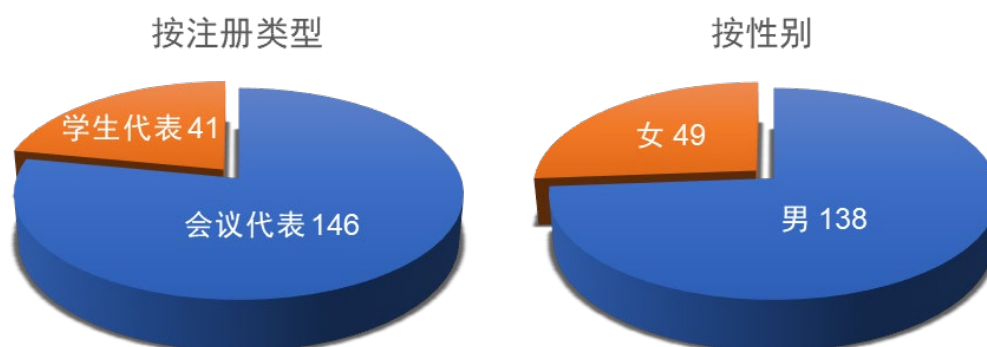
- **Community Review:** as shown in the timeline table, the overall scientific ocean drilling community will have two opportunities for commenting in January and March 2020; earlier drafts will be reviewed by the science plan working group delegates.
- **External Review:** in addition, draft **version 2** of the new science plan will be sent to a group of external reviewers, including researchers outside the IODP community.

参会人员问卷调查材料综述

截止 2018 年 8 月 5 日, 通过中国 IODP 会议网站注册和填写调查问卷的参会人员共 187 位, 他们来自国内 43 个单位, 从单位和研究领域分布上具有一定的代表性, 以下基本信息统计情况。

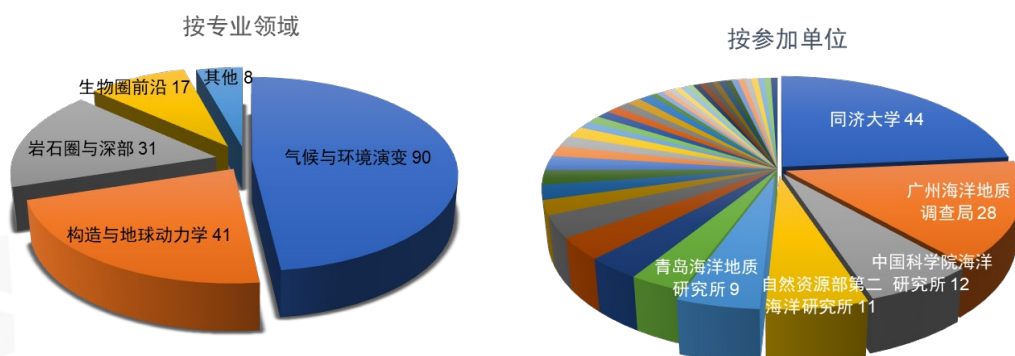
1、按注册类型和性别统计

注册的 187 人中, 包括会议代表 146 人、学生代表 41 人, 学生代表占 28%。
全体注册人员中, 男性 138 人、女性 49 人, 女性占 26%。



2、按专业领域统计

根据参会人员提供的研究方向, 结合会议设置的专题名称, 大致按以下四个专业领域归类, 涉及技术和其他方向归入“其他”类别。结果显示全部注册的人员中, “气候与环境演变”领域 90 人、“构造与地球动力学”领域 41 人、“岩石圈与深部”领域 31 人、“生物圈前沿”领域 17 人。其中, “气候与环境演变”和“构造与地球动力学”领域参会人员占 70%, 体现我国参加 IODP 研究的传统优势。

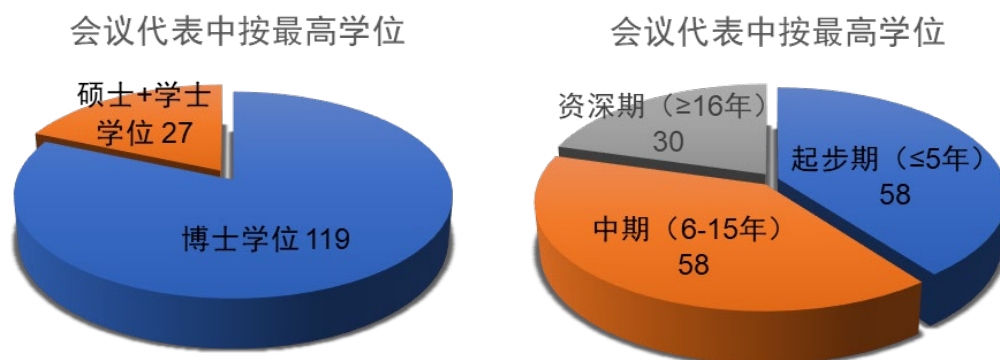


3、按参加单位统计

注册的 187 人分别来自国内 43 个单位，参加人数超过 6 人的单位分别为（降序排列）：同济大学 44 人、广州海洋地质调查局 28 人、中国科学院海洋研究所 12 人、自然资源部第二海洋研究所 11 人、青岛海洋地质研究所 9 人、南京大学 6 人、上海交通大学 6 人、中国科学院广州地球化学研究所 6 人、中国科学院南海海洋研究所 6 人。参加会议人数与单位参与 IODP 航行科学家数量稍有不一致，部分航行较少的单位积极参加该会议，表现其参与 IODP 研究的积极性。

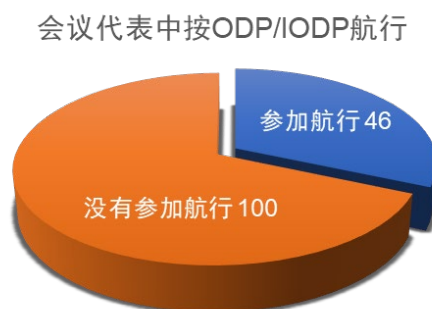
4、会议代表中按最高学位和职业年限统计

在 146 位会议代表中，具有博士学位 119 人，硕士和学士学位 27 人，具博士学位占 82%。其中，职业生涯起步期(Early Career)58 人、中期(Mid-Career) 58 人、资深期 (Senior) 30 人，资深期占 21%，较美国和欧洲两类会议明显偏低（美国会议资深期人数占 61%、欧洲资深期人数占 57%）。



5、会议代表中按 ODP/IODP 航次科学家统计

会议代表 146 人中，参加 ODP/IODP 航行的研究人员为 46 人，占 32%，显示航行科学家更有兴趣参加 IODP 未来科学计划研讨，他们来自国内 19 个单位。



调查问卷填写情况统计

1、你认为 IODP 计划在 2023 年以后需要继续执行吗？为什么？

参会的 185 人回答了这个问题，回答都是“需要”或“十分必要”。

你为什么参加 IODP 计划（参加航行或航次后研究）？

参会的 185 人回答了这个问题，答案包括：获取高质量样品、开展前沿科学

研究、提供国际科技合作和共享平台、好奇心驱使等，大量答案结合了自身的研究兴趣。

你参加 IODP 计划的收获是什么？

参会的 185 人回答了这个问题，参加过大洋钻探航行、航次后研究、以及与大洋钻探有关研究的回答包括：获取研究使用的关键样品、开展前沿科学研究、提高了研究和成果水平、拓展国际视野和启发思维、结识国际合作伙伴、提升自身的国际影响力等。

IODP 对你吸引是什么？

参会的 185 人回答了这个问题，回答的内容包括：国际前沿研究水平、获取高质量的岩芯样品、针对重大科学问题、志同道合的国际研究团队、开放/竞争/平等的合作环境、采样/测试/分样/研究等运作方式、最先进的深海钻探取芯技术等。

你今后打算申请参加 IODP 计划航次吗？请具体说明原因。

参会的 185 人回答了这个问题，绝大多数回答都是打算申请或计划参加 IODP 计划航次，除少量即将退休资深研究人员和个别非该领域参会人员不打算申请。

2、你认为 IODP 科学计划（2013-2023）《照亮地球：过去、现在与未来》的 4 大主题 14 个挑战在过去的五年中取得哪些突出进展？

参会的 182 人回答了这个问题, 多数有效的回答是针对参会人员自身领域的评价, 综合回答的内容包括: 主题 1 (气候和海洋变化) 和主题 3 (地球联系) 取得突出进展, 包括挑战 2 冰盖与海平面、挑战 3 和挑战 4 气候演变热带过程、挑战 9 大陆破裂新模式、挑战 11 俯冲机理等。同时, 主题 2 (生物圈前沿) 也有突出进展, 如挑战 6 深部生命极限等。

你认为在 2023 年后的科学计划需要增加新的主题或挑战吗? 具体内容是什么?

参会的 182 人回答了这个问题, 其中, 152 人认为需要考虑增加新的主题或挑战, 13 人认为不需要增加新的内容, 17 人没有建议。回答增加新的研究内容包括: 全球变暖、人类世研究、气候变化的低纬过程和高低纬联动、环境与生物协同演化、生命起源、莫霍钻、地幔柱、初始俯冲机制、深部碳循环、海底工程与地质灾害、人类与海洋和谐发展等。

3、什么样的科学问题在 2023 年以后仅可能通过 IODP 计划来实现? 怎样实现?

参会的 184 人回答了这个问题, 回答中频繁出现以下科学问题: 莫霍面和上地幔组成、大陆裂解机制、俯冲带过程、深部矿产资源、深部生物圈过程、长期气候演变历史等。

需要新的钻探技术或钻探船? 更多的国际合作? 等等。请具体说明。

参会的 184 人回答了这个问题, 其中 174 人回答需要新的钻探技术或钻探

船，包括多数建议建造中国的大洋钻探船，7 人没有建议。

4、你希望中国在 2023 年后 IODP 计划发挥怎样的作用？

参会的 184 人回答了这个问题，都是希望中国在未来的大洋钻探中起到领导或主导使用，或成为与美、日、欧并列的平台提供者之一。

提高会员费以增加参加航次的名额？

参会的 184 人回答了这个问题，回答“赞成”152 人，“不赞成”29 人；回答“不知道”3 人。

成为 IODP 第四个平台与美、日、欧共同领导 IODP 计划？

参会的 184 人回答了这个问题，其中 182 人回答赞同和有必要，2 人没有建议。

你计划发挥什么使用？请具体说明。

这个有充分个性发挥的题目，参会的 183 人回答。其中，46 位航行人员回答的内容包括：做好现有研究和争出高水平成果、参与提交 IODP 建议书、争取主导 IODP 钻探航次、培养年轻人、积极参与 IODP 科普和培训等；其他会议代表的回答主要包括：持续关注 IODP 计划及相关活动、申请参加 IODP 航行和研究、继续推动南海钻探航次、利用 IODP 航次样品开展相关前沿研究、参与新一代钻探设备研发等；41 位学生代表回答的主要内容包括：继续参与相关航次后研究、认真学习提高专业水平、做好储备希望将来有机会参加航次等。

“气候与环境演变” 进展和研究展望综述

田军¹, 柳中晖²

¹ 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海

² 香港大学地球科学系 香港

一、近 5 年 IODP “气候与环境演变” 进展

“国际大洋发现计划” (International Ocean Discovery Plan, IODP, 2013-2023) 将 “气候与海洋变化: 解读过去, 预示未来” 列为第 1 大科学主题。2014-2019 年, IODP 执行了 13 个 “气候与环境演变” 的航次 (图 1, 表 1), 聚焦 5 个科学主题, 季风、大洋环流、构造运动与气候变化、南极冰盖的演变史、海汽耦合控制的西太平洋暖池演变。

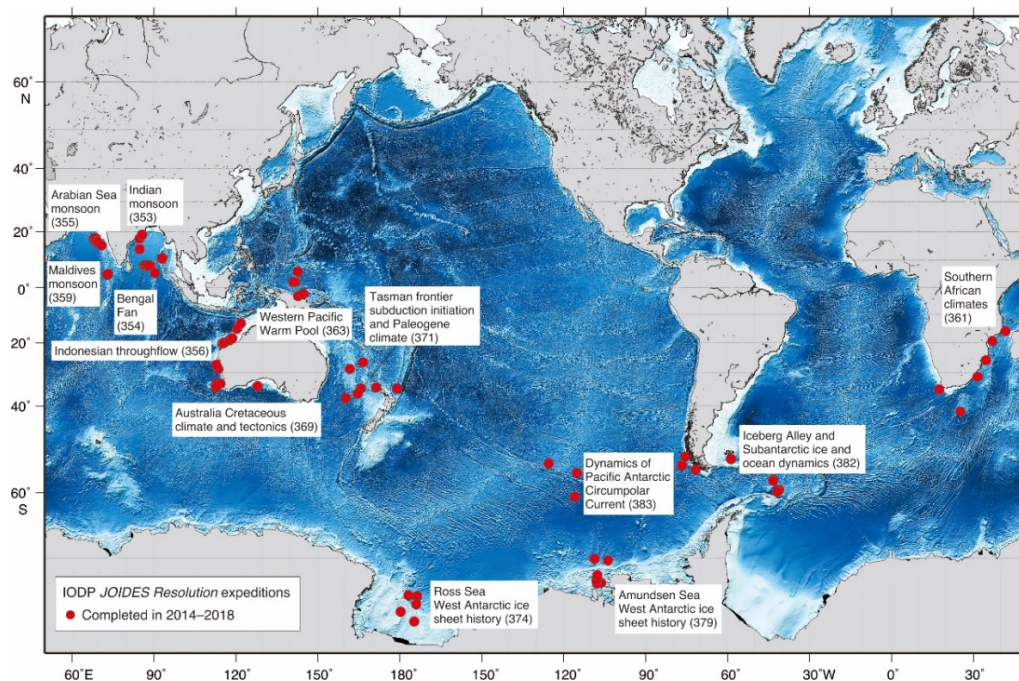


图 1、IODP “气候与环境演变” 航次分布图 (2014-2019 年)。

IODP-353 航次获得了新生代各个时间尺度上印度季风演变的深海沉积记录 (Clemens et al., 2015)。IODP-354 航次取得了自始新世以来孟加拉扇的沉积记录, 特别是中新世—更新世的连续沉积序列和精细剖面结构 (France-Lanord et al., 2015)。IODP-355 航次在印度沉积扇的 2 个站位获取了约 10 Ma 以来的沉积片段以及 2 Ma 以来的连续沉积记录 (Pandey et al., 2015)。这 3 个航次旨在通过研究深海沉积扇的沉积结构, 区分构造活动和气候变化对山脉剥蚀风化的效应, 梳理亚洲季风降雨和风场的耦合关系, 并分析季风环流对不同驱动机制的响应敏感度, 进而详细探索亚洲季风与青藏高原山脉的剥蚀和风化的动力联系。

IODP-359 航次在马尔代夫内海获得了晚渐新世以来碳酸盐台地的连续沉积记录, 用以重建热带印度洋海平面变化, 以及受季风驱动的印度洋海流和碳酸盐台地的演化 (Betzler et al., 2016)。

IODP-356 航次在澳大利亚西部和西北岸外的钻探, 可以为重建中新世以来澳洲季风和澳大利亚内陆干旱化的变化提供海洋沉积记录 (Gallagher et al., 2017)。IODP-363 航次获得了澳大利亚西北岸外晚中新世以来、西南热带太平洋边缘晚更新世以来、以及西太平洋暖池北部晚渐新世/早中新世以来的连续海洋沉积记录 (Rosenthal et al., 2017)。这些站位的沉积速率普遍较高 (最高 60–75 cm/ka; 巴布亚新几内亚岸外 U1484 和 U1485 站位), 可以满足轨道到百年尺度的高分辨率研究, 探索暖池的演变及其与全球季风系统、热带辐合带 (ITCZ)、类厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO) 气候的关系。IODP-356 和 363 航次还可探索

上新世以来印度尼西亚穿越流的变迁以及陆架生物礁系统的发育和演变 (Gallagher et al., 2017; Rosenthal et al., 2017)。

表 1、2014-2019 年 IODP 已执行的“气候与环境演变”的航次

航次名称	航次号	执行日期	平台	科学主题
Indian Monsoon Rainfall	353	Nov 29, 2014 - Jan 29, 2015	JRSO	季风
Bengal Fan	354	Jan 29 - Mar 31, 2015	JRSO	
Arabian Sea Monsoon (CPP)	355	Mar 31 - May 31, 2015	JRSO	
Maldives Monsoon and Sea Level	359	Sept 30 - Nov 30, 2015	JRSO	
Indonesian Throughflow	356	July 31 - Sept 30, 2015	JRSO	大洋环流
Dynamics of Pacific Antarctic Circumpolar Current	383	May 20 - July 20, 2019	JRSO	
Southern African Climates and Agulhas Current Density Profile	361	Jan 30 - Mar 31, 2016	JRSO	
Western Pacific Warm Pool	363	Oct 6 - Dec 8, 2016	JRSO	西太暖池
Australia Cretaceous Climate and Tectonics	369	Sep 26 - Nov 26, 2017	JRSO	构造与气候
Tasman Frontier Subduction Initiation and Paleogene Climate	371	July 27 - Sept 26, 2017	JRSO	

Ross Sea West Antarctic Ice Sheet History	374	Jan 4 - Mar 8, 2018	JRSO	南极冰盖演变史
Amundsen Sea West Antarctic Ice Sheet History	379	Jan 18 - Mar 20, 2019	JRSO	
Iceberg Alley and Subantarctic Ice and Ocean Dynamics	382	Mar 20 - May 20, 2019	JRSO	

IODP-361 航次在莫桑比克海峡的钻探可用来重建 5Ma 以来 Agulhas 穿越流的演变。作为南半球最强的西部边界流, Agulhas 穿越流控制着大西洋径向反转流 (AMOC) 的强度, 影响全球气候。IODP-369 航次为研究地球如何从白垩纪的温室气候过渡到新生代的冰室气候提供了绝佳的机会 (Huber et al.,2018)。IODP-371 航次在西南太平洋塔斯曼海的钻探探讨构造与古近纪气候变化的关系, 构建俯冲起始的地球动力学模型 (Sutherland et al.,2018)。

IODP-374 航次沿着外大陆架到东罗斯海钻探, 由于风驱动的洋流将温暖的海水输送至冰盖边缘, 导致西南极冰盖加速消融, 该航次旨在解决新近纪和第四纪的气候和海洋变化与南极冰盖演变的关系 (McKay et al.,2018)。阿蒙森海的 IODP-379 航次在南极的阿蒙森海钻探, 该区域一直被认为是西南极冰盖最脆弱的部分。今天, 温暖的环南极深层水正在冲击阿蒙森海架, 导致多数地方西南极冰盖底部融化, 该航次可重建环南极深层水的演变历史, 用于评估温暖海水上涌与冰盖消融的关系。斯科舍海的 IODP-382 航次将评估地质历史时期南极冰川的融化与洋流、海冰以及大气状况的关系、评估海平面上升的速率和幅度、探讨

冰山如何形成和运动；靠近德雷克海峡智利边缘的 IODP-383 航次则重建环南极洋流的演变史。

二、2023 年后研究展望

IODP-China 会前的调研工作显示,诸如与冰盖变化紧密关联的海平面变化、季风、大洋环流仍然是普通大众和科学界关注的热点。从美国 NEXT 会议、日本 J-DESC 会议、欧洲 PROCEED 会议和澳新 OCEAN PLANET 会议讨论的结果来看,“气候与环境演变”仍然是 IODP 最重要的科学主题。IODP 科学计划工作组在草拟的 2023 年后路线图里也把气候变化和海洋健康列为五个“Flagship Initiatives”中的两个主题。探索古气候演变的机制、并利用其结果为预测未来气候变化服务,仍然是摆在科学家面前的头等大事,它事关人类社会的可持续发展。我们从(1)低纬过程、(2)高纬过程、(3)高低纬相互作用三个方面提出我们的研究展望。

1.低纬过程

国际大洋钻探计划,从 ODP 到 IODP 再到 IODP,其科学计划的制定无一不秉承两大高纬驱动理论。第一,南斯拉夫人“Milutin Milankovitch”创建的“米兰科维奇理论”。它比肩板块构造学说,是大洋钻探计划的重要成果,也是地球科学两大理论之一,它很好地阐述了气候变化冰期旋回的机制,可用一句话表述——“北纬 65 度夏季太阳辐射量的周期性变化控制地表气候变化的冰期旋回”,只有夏季太阳辐射足够低,冬季的降雪才能累积成冰最后形成冰川

(Milankovitch, 1930)。第二，古海洋学的创始人之一、已故的美国哥伦比亚大学 Lamont Doherty 实验室的 Wallace Broecker 教授倡导的“大洋传送带”理论 (Broecker, 1991) 与“米兰科维奇理论”如出一辙，同样强调北大西洋高纬形成的北大西洋深层水是驱动全球大洋环流的发动机。

“米兰科维奇理论”强调地球轨道参数对北半球高纬太阳辐射的调控作用，对解释新生代轨道尺度（万年）上的气候变化周期具有独特的优势。但微小的轨道变化如何引发地表的气候巨变迄今仍无完美的解决方案。比如偏心率对太阳辐射的贡献不足 1‰，但古气候记录中的 10 万年和 40 万年偏心率周期却是新生代气候变化的主导周期 (Tian et al., 2008)。

中国科学家加入国际大洋钻探计划已近 21 年，在长期的研究中发现低纬是气候变化的引擎，高纬只是开关。该认识的形成源自海洋碳储库 40 万年长偏心率周期的发现，最初在南海大洋钻探 184 航次的深海底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中发现 (Wang et al., 2003)，后来证明是全球性事件 (Wang et al., 2010)，其周期在 1.6Ma 之前是标准的 40 万年，但 1.6Ma 之后延长到约 50 万年，这显然是轨道驱动无法解释的。同济大学汪品先院士及其团队借鉴厦门大学焦念志院士提出的“微型生物碳泵”的概念 (Jiao et al., 2010, 2011)，提出了碳循环 40 万年长偏心率周期的“溶解有机碳假说” (Wang et al., 2014)。该假说(图 2)认为，海洋碳储库的 40 万年长偏心率周期可能源自低纬全球季风变化，低纬过程触发了寡营养海洋(比如 subtropical gyre)中的生产力，增加海水中 POC/DOC 比值进而降低海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值，是碳循环 40 万年长偏心率周期的主因，碳循环通过

调控大气二氧化碳浓度进而控制全球气候。

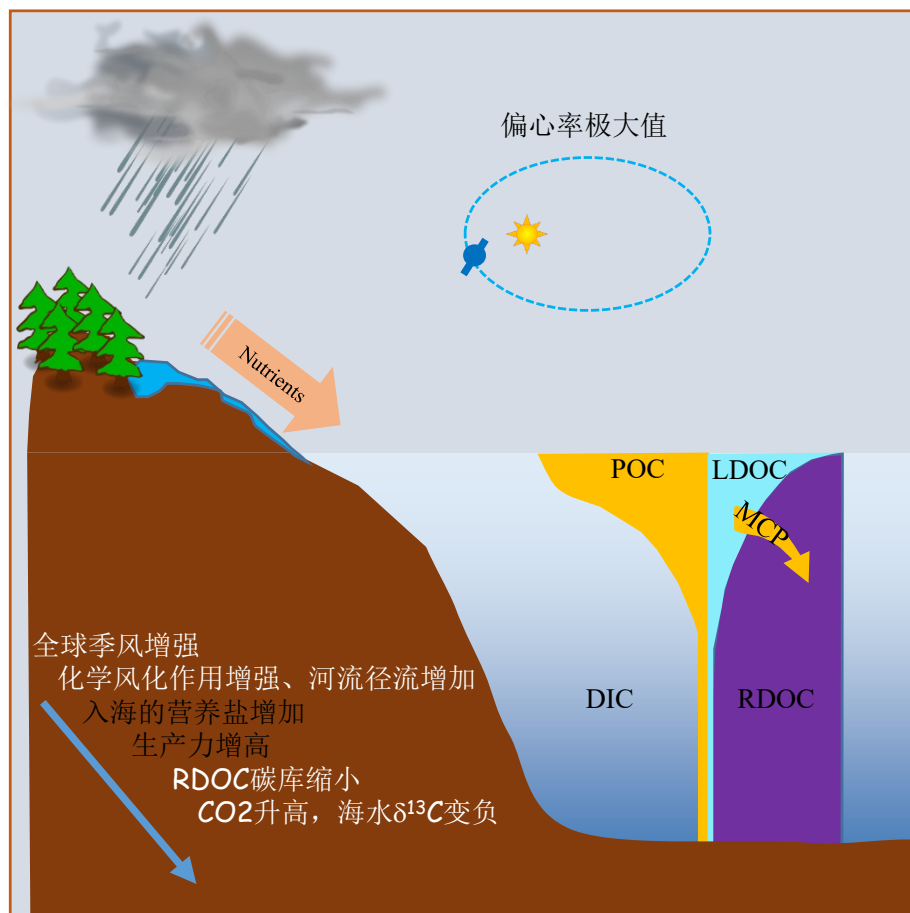


图 2、新生代气候变化的“溶解有机碳假说”示意图。POC，颗粒有机碳；DIC，溶解无机碳；LDOC，活性溶解有机碳；RDOC，惰性溶解有机碳。据 Wang et al. (2014) 。

中国科学家发现，古气候变化是太阳辐射能量通过水循环和碳循环在地表系统中进行分配的结果，在此过程中，低纬相对高纬发挥了非常重要的作用，但在目前，低纬的作用被严重低估。低纬过程的主体是水的气态和液态的交换，这种水文循环以经向上“气候赤道”（赤道间汇聚带，ITCZ）的迁移和伸缩和纬向上

沃克环流的变化为特点，具体表现为全球季风（Global Monsoon）和厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的变化。水文循环通过降雨调控物源区化学风化作用，继而改变大洋的陆源营养物质的输入，通过生物泵和微生物碳泵影响大洋碳储库的变化。轨道周期上，低纬的水文循环通过调控碳循环实现对古气候变化的控制。

在低纬过程中，全球季风和沃克环流的相互关系至少在较长的构造时间尺度上需要进一步的研究。最近的对东太冷舌的重建工作（Liu et al., 2019）澄清了对沃克环流演化的认识，而已有假设（Meng et al., 2018）认为沃克环流的增强是晚更新世间冰期东亚季风有所加强的控制因素。最近几个季风航次的研究结果将进一步证实晚中新世以来季风演化和低纬海洋状态，特别是沃克环流的演化，之间的紧密关系。

中国科学家提出，“道尔效应”很可能是衡量全球尺度上的季风规模和强度变化的尺子，可通过表层海水和冰芯气泡的氧稳定同位素差值来重建。“道尔效应”由生物圈光合作用和呼吸作用过程氧同位素分馏程度控制。在轨道时间尺度上，低纬植被对全球道尔效应波动有着决定性影响。低纬水循环规模会影响陆地相对湿度和降水同位素，继而影响低纬陆地植被光合作用时叶子水的同位素，最终反映在道尔效应数值上。初步重建结果得到瞬变模拟结果的证实，表明道尔效应确实可以衡量轨道尺度上低纬水循环规模和强度的波动历史。

2.高纬过程

高纬过程的研究主要关注高纬和极地冰盖和温度的变化对全球气候的影响和控制，是长期以来 IODP 研究的中心方向。与“米兰科维奇理论”一致，Levy

et al (2019) 通过研究南极边缘的地质记录冰与氧同位素记录进行对比, 发现斜率周期的出现控制着南极冰盖的演变, 分析发现当冰盖边缘向海洋延伸时, 对斜率变化的敏感性增加。认为可能时斜率驱动的温度梯度变化影响了环南极流位置和强度, 增加(减少)跨越南极大陆边缘的海洋热传输(图 3)。

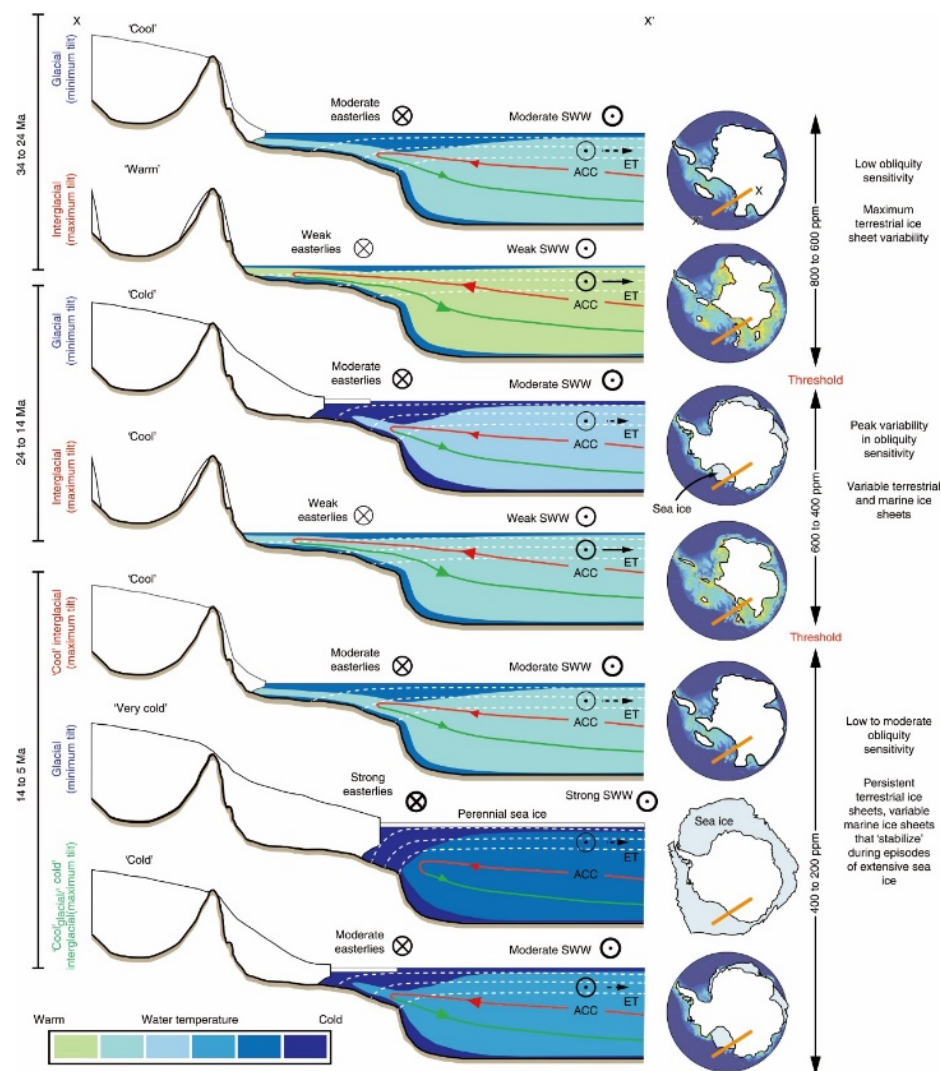


图 3、过去 34Ma 来不同大气 CO₂ 浓度条件下冰盖演化模型 Levy et al (2019)。

Wallace Broecker 教授倡导的“大洋传送带”理论 (Broecker, 1991) 强调高纬过程里的另一重要因素, 即环流变化。环流变化与气候变化的关系多数停留

在理论层面,即计算机模式提供了海洋环流在不多气候状态下的可能变化。然而由于多数情况下缺乏可靠的洋流指标,地质记录很多时候未能证实模式模拟结果。

我们展望近期的几个南大洋航次将为高纬过程的研究提供进一步的线索,包括海洋环流的变化。结合以前的北大西洋航次(例如 IODP 342, Norris et al., 2014),有可能重建早期 AMOC 和 ACC 演化历史,以探明洋流演化和全球气候变化及海道关闭的关系。基于北大西洋的研究,在南极冰盖首次形成时(~ 34 百万年前),北大西洋海表温度并没有立即下降,猜测当时的南极冰盖形成触动了现代意义上的 AMOC 形成(Liu et al., 2018),与模式模拟结果一致(Goldner, 2014)。然而早期 AMOC 的重建争议较大,需要进一步发展可靠的洋流指标。

3. 高低纬相互作用

高低纬相互作用涉及到水汽和能量的传输,因此在全球气候变化的研究中尤为重要。在轨道尺度上,低纬水循环表现为几乎由岁差主导(Chen et al., 2016),而海洋特别是高纬海洋主要表现为斜率或短偏心率周期。如何联系起此两种相对独立的信号将是古气候变化研究的一大难点。尽管低纬水循环通过碳循环在 40 万年长偏心率周期上与气候变化相联系(Wang et al., 2014),目前还不清楚何种机制控制了岁差与斜率周期上的转换变化。低纬温跃层的变化,在轨道尺度和构造尺度上,可能为高低纬相互作用提供了一有效的海洋途径。已有研究认为低纬东太冷舌的形成通过温跃层的变化与高纬气候密切相关(Liu et al., 2019)。

另一方面,高低纬相互作用过程还存在大量未知,已有机制并不能完全解释

观测到的地质现象。我们可能对 subtropical gyre 的作用缺乏足够了解。一方面, subtropical gyre 低营养海区的生物作用及其对碳循环的贡献还不是特别清楚。另一方面, subtropical gyre 海区的环流变化及其对气候的响应也未知, 这也许是联系高低纬水汽和能量传输的关键区域。2023 之后的 IODP 很有必要加强此关键区域的研究。

中国科学家的研究成果反映了 IODP-China 的观点——“探索气候变化的低纬驱动机制”应成为 IODP 下一阶段的科学主题之一。低纬水循环的演变特征及其与碳循环的关系, 低纬温跃层的演变及其与中高纬的关联, 大洋环流变化在高低纬热量传输之间所起的作用, 与冰盖变化紧密关联的海平面变化及其与碳循环的关系, 重新认识低营养海区 subtropical gyre 的作用。回答这些科学问题, 需要 IODP 布置一系列经向和纬向上的 transect, 用更好的技术获取新生代连续的深海沉积剖面, 利用不断发展、日趋完善的各种古气候替代性指标 (Proxy), 揭示气候演变的驱动机制。

参考文献

- Betzler, C.G., Eberli, G.P., Alvarez-Zarikian, C.A., and the Expedition 359 Scientists, 2016. Expedition 359 Preliminary Report: Maldives Monsoon and Sea Level. International Ocean Discovery Program 2016. doi:10.14379/iodp.pr.14359.12016.
- Broecker W S, 1991. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 4(2):79-89.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Sinha, A., Spötl, C., Yi, L., Chen, S., Kelly, M., Kathayat, G., Wang, X., Li, X., Kong, X., Wang, Y., Ning, Y., Zhang, H., 2016. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age

- terminations. *Nature* 534, 640-646.
- Clemens, S. C., Kuhnt, W., LeVay, L. J., and the Expedition 353 Scientists, 2015. Expedition 353 Preliminary Report: Indian Monsoon Rainfall. International Ocean Discovery Program 2015, doi:10.14379/iodp.pr.14353.12015.
- France-Lanord, C., Spiess, V., Klaus, A., and the Expedition 354 Scientists, 2015. Expedition 354 Preliminary Report: Bengal Fan-Neogene and late Paleogene record of Himalayan orogeny and climate: a transect across the Middle Bengal Fan. International Ocean Discovery Program 2015. doi:10.14379/iodp.pr.14354.12015.
- Gallagher, S. J., Fulthorpe, C. S., Bogus, K., and the Expedition 356 Scientists, 2017. Expedition 356 Preliminary Report: Indonesian Throughflow-A 5 million year history of the Indonesian Throughflow, Australian monsoon, and subsidence on the northwest shelf of Australia. International Ocean Discovery Program 2017: doi:10.14379/iodp.pr.14356.12017.
- Gohl, K., Wellner, J.S., Klaus, A., and the Expedition 379 Scientists, 2019. Expedition 379 Preliminary Report: Amundsen Sea West Antarctic Ice Sheet History. International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.379.2019>
- Goldner, A., Herold, N. & Huber, M., 2014. Antarctic glaciation caused ocean circulation changes at the Eocene–Oligocene transition. *Nature* 511, 574-577.
- Hall, I.R., Hemming, S.R., LeVay, L.J., and the Expedition 361 Scientists, 2016. Expedition 361 Preliminary Report: South African Climates (Agulhas LGM Density Profile). International Ocean Discovery Program. <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.361.2016>
- Huang, E., Wang, P., Wang, Y., Tian, J., Ma, W., Li, S., in preparation. Dole Effect as a measurement of the low-latitude hydrological cycle over the past 800,000 years.
- Huber, B.T., Hobbs, R.W., Bogus, K.A., and the Expedition 369 Scientists, 2018. Expedition 369 Preliminary Report: Australia Cretaceous Climate and Tectonics. International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.369.2018>
- Jiao N, Azam F. Microbial carbon pump and its significance for carbon

- sequestration in the ocean. In: Jiao N, Azam F, Sanders S (Eds), Microbial carbon pump in the ocean, 2011, Science/AAAS, Washington DC, pp 43-45.
- Jiao N, Herndl GJ, Hansell DA, et al, 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 8: 593-599.
- Levy, R.H., Meyers, S.R., Naish, T.R., Golledge, N.R., McKay, R.M., Crampton, J.S., DeConto, R.M., De Santis, L., Florindo, F., Gasson, E.G.W., Hardwood, D.M., Luyendyk, B.P., Powell, R.D., Clowes, C. and Kulhanek, D.K. (2019) Antarctic ice-sheet sensitivity to obliquity forcing enhanced through ocean connections. *Nat. Geosci.*, 12, 132–137.
- Liu, J., Tian, J., Liu, Z., Herbert, T. D., Fedorov, A. V. & Lyle, M., 2019. Eastern Equatorial Pacific cold tongue evolution since the late Miocene linked to extratropical climate. *Science Advances*, 5, eaau6060, DOI: 10.1126/sciadv.aau6060.
- Liu, Z., He, Y., Jiang, Y., Wang, H., Liu, W., Bohaty, S. M. & Wilson, P. A., 2018. Transient temperature asymmetry between hemispheres in the Palaeogene Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, 11, 656-660.
- McKay, R.M., De Santis, L., Kulhanek, D.K., and the Expedition 374 Scientists, 2018. Expedition 374 Preliminary Report: Ross Sea West Antarctic Ice Sheet History. International Ocean Discovery Program, 374. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.374.2018>
- Meng, X. et al., 2018. Mineralogical evidence of reduced East Asian summer monsoon rainfall on the Chinese loess plateau during the early Pleistocene interglacials. *Earth Planet. Sci. Lett.* 486, 61-69.
- Milankovitch, M., 1930. Mathematische Klimalehre und astronomische. Theorie der Klimaschwankungen Handbuch der Klimatologie, Bd. I.: Berlin, Verlag. Borntrager.
- Norris, R. D., Wilson, P. A., Blum, P. & the Expedition 342 Scientists, 2014. In *Proc. Integrated Ocean Drilling Program Vol. 342*, doi:10.2204/iodp.proc.342.105.2014 (Integrated Ocean Drilling Program, 2014).
- Pandey, D.K., Clift, P.D., Kulhanek, D.K., and the Expedition 355 Scientists, 2015. Expedition 355 Preliminary Report: Arabian Sea

- Monsoon-Deep sea drilling in the Arabian Sea: constraining tectonic-monsoon interactions in South Asia. International Ocean Discovery Program 2015. doi: 10.14379/iodp.pr.355.2015.
- Rosenthal, Y., Holbourn, A.E., Kulhanek, D.K., and the Expedition 363 Scientists, 2017. Expedition 363 Preliminary Report: Western Pacific Warm Pool-Neogene and Quaternary records of Western Pacific Warm Pool paleoceanography. International Ocean Discovery Program 2017. doi:10.14379/iodp.pr.14363.12017.
- Sutherland, R., Dickens, G.R., Blum, P., and the Expedition 371 Scientists, 2018. Expedition 371 Preliminary Report: Tasman Frontier Subduction Initiation and Paleogene Climate. International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.371.2018>
- Tian, J., Zhao, Q.H., Wang, P.X., Li, Q.Y., Cheng, X.R., 2008. Astronomically modulated Neogene sediment records from the South China Sea. *Paleoceanography* 23, PA3210.
- Wang, P.X., Li, Q.Y., Tian, J., Jian, Z.M., Liu, C.L., Li, L., Ma, W.T., 2014. Long-term cycles in the carbon reservoir of the Quaternary ocean: a perspective from the South China Sea. *National Science Review* 1, 119-143.
- Wang, P.X., Tian, J., Cheng, X.R., Liu, C.L., Xu, J., 2003. Carbon reservoir changes preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event. *Geology* 31, 239-242.
- Wang, P.X., Tian, J., Lourens, L.J., 2010. Obscuring of long eccentricity cyclicity in Pleistocene oceanic carbon isotope records. *Earth and Planetary Science Letters* 290, 319-330.

“构造与地球动力学”进展和研究展望综述

丁巍伟¹, 孙珍²

¹ 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012

² 中国科学院南海海洋研究所 广州

近5年来,国际大洋发现计划(IODP)在“构造与地球动力学”领域取得了一系列重大的进展,探索了板块俯冲的起始机制,板块俯冲对地质灾害的影响,西太平洋边缘海“板缘盆地”张裂过程,以及慢速扩张洋中脊的洋壳的结构,对地球动力学的一些经典问题进行了证实或者证伪,极大的完善和丰富了板块构造学的理论。未来十年大洋钻探的目标包括板块构造理论的经典问题,也即选取合适的钻探区域钻遇莫霍面,获取大洋岩石圈的深部结构;在西太平洋俯冲体系这一复杂构造区域,探索俯冲带的起始机制,以及包括南海,花东海盆等板缘型边缘海盆地的生命史,及边缘海系统的相互作用。同时也更关注生命与地球的联系,尤其是俯冲带区地震的发证机制、周期和发生海啸的影响因素。

1. 近5年构造与地球动力学领域重要进展

(1) 俯冲带区俯冲物质与大地震/海啸的联系

2016年IODP在苏门答腊俯冲带区针对2004年印度洋9.2级大地震和海啸的机制进行钻探,探索增生楔结构与物质属性对浅部大地震过程的影响。苏门答腊北部俯冲带进入俯冲带的物质厚度可达4-5 km,钻探获取的力学、摩擦力和水文地质特征表明,该厚层物质是导致大型走滑的主要驱动力,并会放大

地震和海啸的等级 (McNeil 等, 2017)。

(2) 不同扩张速率洋壳结构的建立

2016 年, IODP Exp.360 作为 SloMo (the nature of the lower crust and Moho at slower spreading ridges) 计划的第一阶段开始实施, 航次原计划钻透超慢速扩张的西南印度洋中脊 Atlantis Bank 莫霍面, 但未获成功。航次钻遇了被孤立岩脉切割的大规模辉长岩, 建立了慢速扩张洋壳的下部结构及扩张过程中构造-岩浆相互作用, 对大洋岩石圈深部的性质进行了约束 (Macleod 等, 2017)。

(3) 板块俯冲的起始机制

针对板块俯冲的起始机制, 2014 年, IODP 在伊豆-小笠原-马里亚纳 (IBM) 俯冲带区先后开展了两个钻探航次 Exp. 351&352, 其中 IODP 351 航次目标为九州-帕劳海脊附近西菲律宾海盆的基底和沉积, IODP 352 航次的目标是伊豆前弧区的火山岩。钻探为揭示板块的初始俯冲机制和模型提供重要的证据, 表明俯冲起始之后在不同年代、厚度的大洋岩石圈之间, 由于古太平洋板块的自发俯冲, 先在板块间发生弧前的海底扩张作用, 形成弧前玄武岩, 而古 IBM 弧是在弧前海底扩张形成的小洋盆中形成 (Arculus 等, 2015; Reagon 等, 2019; Ishizuka 等, 2018)。

(4) 以南海为代表的西太边缘海大陆破裂-海盆扩张的过程

2014 年-2018 年期间, IODP Exps. 349, 367, 368, 和 368X 航次以南海海盆扩张时代和洋陆转换过程为主要科学目标, 先后开展了针对减薄陆缘、陆

洋过渡带、早期洋盆、残留扩张脊的钻探，确证了海盆的扩张时代为~33 Ma 至~15 Ma (Li 等, 2015)，揭示南海大陆破裂具有明显不同于以大西洋为代表的两个端元模型（富岩浆型和贫岩浆型）(Sun 等, 2018)，在大陆破裂时有一期强烈的岩浆活动 (Larsen 等, 2018; Ding 等, 2019)，其构造-岩浆-沉积方面的生命演化过程表现出受中生代俯冲带影响的特征 (Sun 等, 2019)。

2. 2023 年后研究展望

对参与“中国 IODP 面向 2023 年后大洋钻探展望”会议有效的 177 份调查问卷表明，所有问卷均认为 IODP 在 2023 年后应继续执行，与“构造与地球动力学”主题相关的内容中，有 55 份认为需要钻的更深，以获取地球的深部结构，深部过程及动力机制，钻透莫霍面依旧是最大的关注热点；12 份关注边缘海盆地，包括陆缘和海盆区；7 份关注地震发震与海啸机制；6 份关注俯冲带及岛弧区，其余包括洋中脊热液活动区，海沟深渊区及海底矿产资源开采等方面。根据以上调查问卷的钻探建议，并结合 IODP 近期召开的多次相关研讨会的总结，我们提出以下的未来钻探方向和备选区域。

2.1 未来钻探方向和备选区域

(1) “莫霍钻”计划

自 1957 年提出“莫霍钻”计划，大洋钻探在 50 多年间进行了多次尝试，如 1966 年提出的“Mohole”计划，以及 2017 年的“SloMo”计划，但均未成功，大洋岩石圈深部结构，包括莫霍面的性质（蛇纹石化蚀变界面还是火成

岩地壳-地幔过渡界面)，上地幔的组成、结构，壳幔的物质循环等依旧存在诸多疑问，钻透地壳依旧是地球科学家的梦想。

未来钻探的目标区域可选择洋壳厚度较薄，又具有代表性洋壳的区域，包括 (I) 西南印度洋中脊区 Site1473A 钻井的继续钻探；(II) 或者在菲律宾海帕尔西维拉洋中脊的作为全球最大的大洋核杂岩 (OCC) 出露区的 Godzilla Megamullion 区域。

(2) 俯冲带物质循环与地质灾害

俯冲带是地表物质返回地球内部，促进地球内部降温和物质-能量交换的场所，同时也是全球火山作用和大型地震-海啸灾害的发生地。通过钻探不同俯冲角度、不同俯冲速率、不同构造场所的俯冲带可以更好地探索以下相关科学问题：(a)俯冲带起始与稳态俯冲机制；(b)俯冲带物质输入-输出与挥发分的运移；(c)俯冲带地震发震机制与周期；(d)俯冲带发生海啸的控制因素。

未来钻探的目标区域包括：(I) 雅浦俯冲带或九州-帕劳海脊南段区域：研究俯冲起始的状态的应力-流体、温度和岩浆情况，观测俯冲起始的控制因素；(II) 俯冲速率超慢的玛丽亚纳海沟南部俯冲带，以研究早期俯冲带的结构、物质输入-输出与挥发分的运移情况；(III) 俯冲速率超快的北汤加俯冲带，以研究发震机制、发震周期的影响因素；(IV) 马尼拉海沟等沉积厚度、类型不同的俯冲带，检验扩张脊高角度斜交俯冲带的构造与物质变化，揭示海啸发生的机制、控制因素、温压流体条件等参数的变化。

(3) 板缘型边缘海构造-岩浆过程与演化机制

南海的钻探结果表明，西太板缘型边缘海在应力背景、地球化学组成、生命史、构造-岩浆过程等诸多方面都具有明显不同于陆内破裂型海盆的特征，且其横向变化快，是检验不同端元条件下边缘海盆地演化机制的理想场所。对西太区域不同类型的边缘海盆地开展钻探，有助于解决以下科学问题：(a) 边缘海陆缘结构与岩浆过程；(b) 边缘海演化及其与俯冲带相互作用；(c) 边缘海盆地扩张脊越迁特点及机制。

未来钻探的目标区域包括：(I) 南海南部陆缘-礼乐滩东北部，与 IODP Exps. 349, 367, 368, 和 368X 钻探区域共轭，通过对比以建立南海东部次海盆完整的破裂-海盆扩张过程；(II) 南海西南次海盆陆缘区，这里对应着慢速扩张区域，构造背景上对应着前新生代俯冲形成的火山岛弧区，可检验慢速扩张下陆缘的张-破裂特点与过程；(III) 西北次海盆共轭陆缘：可检验海盆从破裂向末端未破裂区渐进式推进过程中结构与岩浆过程特点及异同。

(4) 大洋岩石圈结构与生命史

作为地球上的结构主体以及地球上最早的地质体，大洋岩石圈包含有众多地球演化的基础问题和过程，通过钻探大洋岩石圈，可以检验以下科学问题：

- (a) 从扩张到俯冲过程中大洋岩石圈结构与物质（岩浆、流体）的变化；
- (b) 大洋海山链及其与热点-地幔柱关系；(c) 微板块构造-岩浆特点；(d) 其他。

未来钻探的目标区域包括：(I) 北美 Cascadia 俯冲带西侧从扩张脊到俯冲带区域；(III) 西太平洋海山链以检验海山链及其与热点-地幔柱关系；(IV) 太

平洋或马里亚纳海槽北侧微板块。

2.2 未来钻探技术和研究展望

(1) 注重钻探技术

新的钻探周期，必然会要求钻的更深、探的更远。为了实现上述目标，应加强 IODP 钻探技术、钻探设备和钻探能力建设

(2) 注重过程观测

未来的 IODP 不仅关注地球科学本身，更关注生命与地球的关系，包括对地球的自然灾害，地球的循环及速率，以及地球的健康及宜居性等方面的研究，也即用地球系统科学的概念来指导未来的钻探计划。在钻探的过程中，应加强过程观测，以使点上的钻探检验达到过程上的认识。

(3) 年轻钻探研究人才培养

通过成立网络学校或虚拟研究所等方式，尽早培养钻探研究人才，通过设置一定比例上船人员为年轻科学家或研究生的方式，尽早培养和锻炼未来钻探研究方面的精英科学家和首席科学家。

参考文献

- Arculus, R.J., O. Ishizuka, K.A. Bogus, et al., 2015. A record of spontaneous subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana arc[J]. Nature Geoscience 8:728–733, doi:10.1038/ngeo2515.
- McNeil, L.C., Dugan, B., Petronotis, K.E., and the Expedition362 scientists. 2017. Proceeding of the International Ocean Discovery Program, 362:Sumatra Subduction Zone, College Station, TX (International Ocean Discovery Program).

- <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.362.101.2017>
- MacLeod, C.J., Dick, H.J.B., Blum, P., and the Expedition 360 scientists. 2017. Proceeding of the International Ocean Discovery Program, 360: Southwest Indian Ridge Lower Crust and Moho, College Station, TX (International Ocean Discovery Program). doi:10.14379/iodp.proc.360.101.2017.
- Ding, W.W., Sun, Z., Mohn, G., et al., 2019. Lateral evolution of the rift-to-drift transition in the South China Sea: Evidence from multi-channel seismic data and IODP Expeditions 367&368 drilling results. E.P.S.L., in revision.
- Ishizuka, O., R. Hickey-Vargas, R.J. Arculus, et al., 2018. Age of Izu-Bonin-Mariana arc basement[J]. Earth and Planetary Science Letters 481:80–90. doi:10.1016/j.epsl.2017.10.023.
- Larsen, H. C., Mohn, G., Nirrengarten, M., et al., 2018. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea. Nature Geoscience, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0198-1>.
- Li, C.F., Lin, J., Kulhanek, D.K., and the Expedition 349 Scientists, 2015. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 349: South China Sea Tectonics: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.proc.349.2015>.
- Reagan, M.K., D.E. Heaton, M.S. Schmitz, et al., 2019. Forearc ages reveal extensive short-lived and rapid seafloor spreading following subduction initiation[J]. Earth and Planetary Science Letters 506:520–529. doi:10.1016/j.epsl.2018.11.020.
- Sun, Z., Jian, Z., Stock, J.M., Larsen, H.C., Klaus, A., AvRarez Zarikian, C.A., and the Expedition 367/368 Scientists, 2018. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, volume 367/368: South China Sea Rifted Margin, College Station, TX (International Ocean Discovery Program). <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.367368.2018>.
- Sun, Z., Lin, J., Qiu, N., et al., 2019. The role of magmatism in thinning and breakup of the South China Sea. Natural Science Review, in revision.

“岩石圈与深部”进展和研究展望综述

张国良¹, 周怀阳²

¹ 中国科学院海洋研究所; ² 同济大学

板块运动是地球表面最重大的地质活动, 而通过岩浆作用和海底扩张形成的大洋岩石圈构成了板块运动的主体。大洋岩石圈的形成和演化与全球环境变化、地球内外物质交换、以及深部生物圈等密切相关。获得海底基底(岩石、沉积物等)样本是开展大洋岩石圈和深部过程相关研究的前提条件之一, 这需要大洋钻探作为大洋岩石圈和深部过程研究的基本平台。国际上, 自上世纪六十年代开始实行的大洋钻探计划“DSDP-ODP-IODP”是地球科学历史上, 规模最大、历时最长、成就最大的国际研究计划, 一直引领国际地球科学研究的前沿, 并改变着地球科学的发展轨迹。通过大洋钻探航次执行和相关研究, 在大洋岩石圈和深部过程领域取得了令人瞩目的成就。

大洋钻探研究历史上, 在大洋岩石圈形成和深部过程方面取得的成就包括:

(1) 通过一系列大洋钻探, 确认了大西洋洋脊两侧的年龄分布, 与“转换断层”、“海底地磁条带”一并, 最终确立了海底扩张理论, 推动了板块构造/运动理论的确立。(2) 对 Atlantis Bank 等的钻探表明, 下洋壳的辉长岩体是由很多小岩浆体冷凝结晶形成的, 这与至今对板块扩张中心地球物理探测结果一致, 即不存在大的岩浆房。(3) 在大洋中脊形成的洋壳结构随扩张速率的不同而有明显差异。之前所谓的 Penrose 模型可能只能代表快速扩张形成的洋壳结构。(4) 通过对海山链基岩的钻探研究, 揭示了一个相对不动的热点在运动板块之上形成海山链

的现象,验证了上世纪60年代初提出的“热点学说”。(5)通过对洋底高原钻探研究,认识到洋底高原主要由溢流玄武岩组成,并在较短的地质时期内形成(几百万年),是板块构造理论很难解释的。(6)对大陆边缘的钻探,极大地加深了对大陆岩石圈破裂及相关各种岩浆和构造过程的理解,基本厘定了从裂解到海底扩张演变的时间尺度,发展了板块构造理论。(7)通过大洋钻探,最深孔达~2km,认识了洋壳下部结构。

随着科学的发展,近十年来的国际大洋钻探更加重视地球系统科学的发展。大洋岩石圈和深部过程是地球系统科学研究的重要基石,在大洋钻探基础上也取得了令人瞩目的成就。如:(1)过去均认为热点海山链是反映了板块在固定的热点上漂移的结果,通过大洋钻探(尤其是IODP 330航次对路易斯维尔海山链钻探)对比了路易斯维尔海山链、夏威夷海山链和复活节海山链的相对变化,发现三者之间发生了相对位置的变化,这揭示了热点是可以发生移动的,这也反映了地幔本质和对流活动历史(Koppers et al., 2012)。(2)洋内板块俯冲起始机制是制约理解板块构造运动驱动力的重要方面,一直以来备受关注却争议很大。为了揭示板块俯冲起始机制,国际大洋钻探在伊豆小笠原-马里亚纳俯冲系统开展了三个航次钻探(ODP 350、351和352)。弧前玄武岩和玻安岩是与起始俯冲密切相关的两类火山岩,是解读起始俯冲的突破口(Pearce et al., 1992; Reagan et al., 2019)。IODP 352航次在小笠原弧前钻遇了三类岩石,按照喷发次序分别为弧前玄武岩(51.9-51.3 Ma)、低硅玻安岩和高硅玻安岩(51.3-50.3 Ma; Reagan et al., 2019)。通过研究认识到,最早期的弧前玄武岩起源于亏损的印

度洋型地幔，提出西太平洋板块起始俯冲的新模型：起始俯冲发生于 Izanagi 板块和太平洋板块之间的转换断层。(3) 南海是认识大陆边缘海盆张裂模式的典范和切入点，通过南海海盆基底的大洋钻探，认识到南海有独特的张裂模式，发现南海具有印度洋型 (Dupal 异常) 的地幔组成性质，在晚期岩浆活动出现高度富集 CO₂ 的岩浆 (Zhang et al., 2017)，使得南海成为认识深部碳释放规律的重要场所。(4) 为了研究洋壳结构和增生模式，IODP 345 航次对快速扩张脊形成的 Hess Deep 下地壳原始辉长岩进行钻探研究，进一步确认了扩张速率对岩浆房过程的控制作用，然而其成层性和岩性代表过去没有认识到的一段原始辉长岩下地壳模型 (Gillis et al., 2014)，与 Oman 蛇绿岩模型 (Penrose 模型) 明显不同。

尽管过去半个世纪大洋钻探对认识大洋岩石圈和地球深部过程起到巨大推动作用，然而，关于地球深部过程的科学问题远远没有解决。一些早期阶段提出的重大科学问题，由于钻探技术困难没有得到解决，仍然困扰着地球科学家。随着地球系统科学的提出和逐渐发展，逐渐增生出更多亟待解决的科学问题。由于历史原因，中国科学家在板块构造理论建立和固体地球科学领域贡献不多。随着中国经济社会发展和科技进步的需求，中国科学家有责任和义务依托新的国内外合作平台，在地球科学领域（尤其是大洋地球科学领域）做出应有的贡献。以下列举我国科学家在大洋钻探研究中，需要努力的重要方向。

(1) 继续支持并积极参与打穿 Moho 面，揭示洋壳增生模式。洋壳的结构和 Moho 面的性质是地球系统最基本的要素，是人们研究板块运动及其产物的

最基本前提。近六十年前打穿 Mohe 的雄心开启了大洋钻探计划的征程，虽然受技术等条件的制约，打穿 Mohe 的目标似乎至今仍相当遥远，但科学家们从来没有放弃过对这个目标的追求。目前，美国、日本等国的大洋钻探计划仍将打穿 Mohe 作为 2023 后大洋钻探计划的重要目标之一，并延承以往基础，一步一趋、踏踏实实地在技术、选点和钻前调查等方面开展着工作。我国科学家也适时地提出了建造能够打穿 Mohe 的科学钻探船的建议。

(2) 西太边缘盆地不同构造类型研究，对典型构造类型开展钻探。西太平洋边缘海是欧亚大陆板块、印度洋板块和太平洋板块相互作用的产物，构成了地球表面最独特的地质地貌。受板块性质、地幔历史和全球动力学的制约及其地质历史演变影响，在西太边缘海的各个盆地展现出形式多样的构造地质类型及其活动历史，为研究板块运动及其循环的最佳场所。以南海的生命史为重点，西太平洋边缘海盆地也为我国科学家发展板块运动理论提供了得天独厚的研究条件。

(3) 通过大洋钻探检验地幔柱假说。板块边界附近的岩浆活动可以归因于板块构造，但板块内部的火山活动并不能直接由板块构造来解释，成为固体地球科学研究的重大挑战之一。上世纪 70 年代，国际上提出“地幔柱”假说解释板内火山的成因，但并没有得到验证。“地幔柱”假说认为一个来自地幔深部的热化学异常热柱，包裹地幔物质先形成洋底高原，紧接着持续的火山活动形成海山链。因此，检验这个假说成立的基本条件是，地表存在一个有成因联系和时间顺序的洋底高原-海山链组合。为了揭示地幔柱的本质，未来大洋钻探应该关注成因上可能有联系的洋底高原和海山链，如卡洛琳高原-海山链系统，以有效检验

这个世纪假说。

(4) 通过大洋钻探火山岩揭示深部地幔物质组成和演化规律。大洋板内玄武岩是地幔熔融的产物，携带了重要的深部地幔信息。其地球化学组成不均一性认识地幔演化和壳幔物质循环的重要视角 (Hofmann, 1997)。目前，人类对板内岩浆作用的认识大部分来自于洋岛，而对海底板内火山研究相对较少，导致对板内岩浆作用缺少相对完整的理解。需要通过科学钻探对不同背景的板内火山岩开展钻探，如不同规模/不同时空分布规律的海山以及洋底高原等钻探，开展精细的岩石学、地球化学、年代学和古地磁学等研究。洋中脊玄武岩组成也可能反映地壳物质再循环，其化学不均一性可能反映大陆裂解物质的再循环。因此，也有必要对洋盆从裂解早期到晚期不同时代的扩张期玄武岩开展钻探研究，揭示地壳组分的贡献。

(5) 通过大洋钻探揭示板块构造体系中的深部碳循环。地球上碳循环具有重要的资源和环境意义。近年来，国际上开始认识到地球内部（地幔/地核）是地球上最大的碳储库 (Sleep & Zahnle, 2001)。大洋板块（主要是火山岩质洋壳和沉积层）是表生环境的重要碳库。在地质历史时期，大洋板块俯冲构成了地表和地球内部之间的大规模物质交换，岩浆过程又重新将碳迁移至地表，这在很大程度上影响着地幔物质组成和全球碳循环。揭示地球碳循环规律是艰巨的历史任务，需要认识地球上不同的富碳端元，尤其是大洋中的富碳端元。有必要通过大洋钻探，认识大洋俯冲板块、岛弧岩浆和板内岩浆的碳组成，综合认识碳在地球深部物质循环各个端元之间的循环规律。

参考文献

- Gillis, K.M., J.E. Snow, A. Klaus, N. Abe, A.B. Adrião, N. Akizawa, G. Ceuleneer, M.J. Cheadle, K. Faak, T.J. Falloon, and others. 2014. Primitive layered gabbros from fast-spreading lower oceanic crust. *Nature* 505:204–207.
- Hofmann, A.W., 1997. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature* 385, 219–229.
- Koppers, A.A.P., T. Yamazaki, J. Geldmacher, J.S. Gee, N. Pressing, H. Hoshi, L. Anderson, C. Beier, D.M. Buchs, L.-H. Chen, and others. 2012. Limited latitudinal mantle plume motion for the Louisville hotspot. *Nature Geoscience* 5:911–917.
- Pearce, J. A. et al. Boninite and harzburgite from Leg 125 (Bonin–Mariana forearc): a case study of magma genesis during the initial stages of subduction. In *Proc. ODP Sci. Results*(eds. Fryer, P., Pearce, J. A. & Stokking, L.) Vol. 125 (Ocean Drilling Program, 1992).
- Reagan, M. K., Heaton, D., Schmitz, M. D., Pearce, J. A., Shervais, J. W. & Koppers, A. A. 2019. Forearc ages reveal extensive short-lived and rapid seafloor spreading following subduction initiation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 506, 520–529.
- Sleep, N.H., Zahnle, K., 2001. Carbon dioxide cycling and implications for climate on ancient Earth. *Journal of Geophysical Research*, 106, 1373–1399.
- Zhang, G.L., Chen, L. H., Jackson, M. G., Hofmann, A. W. 2017. Evolution of carbonated melt to alkali basalt in the South China Sea. *Nature Geoscience*. 10(3), 229–235.

“生物圈前沿” 进展和研究展望综述

王风平¹, 张传伦²

¹上海交通大学; ²南方科技大学

大洋钻探支撑下的生物圈前沿主题研究目前是地球科学和生命科学交叉的前沿阵地和领域, 其中的许多进展已经和正在更新和拓展我们对于地球生命和地球/外星球生命宜居性 (habitability) 的认识和理解。深部生命从深海钻探计划 (DSDP, 1966-1983) 在 20 世纪 70 年代最早提出海洋沉积物中存在细菌的证据, 到 90 年代大洋钻探计划 (ODP, 1985-2003) 获得了令人信服的深部沉积物存在微生物活细胞的证据, 到后来将深部生物圈作为优先研究领域的综合大洋钻探计划 (IODP, 2003-2013) 和国际大洋发现计划 (IODP, 2013-2023), 深部生命研究逐步成为大洋钻探科学研究的核心主题之一。取得了一系列重大的研究进展, 主要包括:

1. 证实存在以氢气为主要能源支撑的黑暗生物圈

氢气是自然界可为微生物代谢生长提供能量的最重要的还原剂, 早在 1992 年, Thomas Gold 就提出了 ‘深地氢气能为微生物生长提供能量来源’ 的假说 (Gold, 1992)。地球深部这个以氢气为主要能量来源, 不依赖于阳光的深部黑暗生物圈的存在得到了不断的证实和拓展, 深部地质过程产生的大量还原性物质为支撑地下庞大的生态系统提供了能量基石, 构建了丰富的地下无机化能营养代谢支撑的地下生态系统 (Chapelle et al., 2002; Colman et al. 2017)。

2. 确定了沉积物中生物圈规模和微生物类型

确定深部生物圈的规模是研究开展以来从未间断的一个科学目标。通过更有代表性的取样(扩展到寡营养大洋盆地)和更加准确的细胞计数手段, Kallmeyer 等人指出海洋沉积物中大约含有 2.9×10^{29} 个微生物细胞, 相当于 4.1×10^{15} g 的碳, 占地球总活体生物量的 0.6%(Kallmeyer et al., 2012)。沉积物中微生物细胞是以细菌还是古菌为主一直存在争议, 最新的推测认为它们数量相当或者古菌略低(Lloyd et al., 2013; Hoshino and Inagaki, 2018); 在陆地深部环境中则是细菌丰度远高于古菌(Magnabosco, 2018)。海洋沉积物中许多古菌类群是目前未培养类群, 深部沉积物经常监测到的典型古菌类群包括深古菌门 (Bathyarchaeota), 洛基古菌门 (Lokiarchaeota), 乌斯古菌门 (Woese archaeota) 和许多甲烷代谢(甲烷产生和甲烷氧化)古菌类群等。除了细菌和古菌, 先前航次获取的沉积物样品中还发现了数量可观的真菌(Orsi et al., 2013)。IODP337 航次获取的深部沉积物中, 69 种进化上有差异的真菌被成功培养; 这些真菌在沉积物中原本以孢子形态存在, 并被认为生存于大约 20 Ma BP 的土壤中(Liu et al., 2017)。此外, 病毒也是深部生物圈的重要组成部分(Engelhardt et al., 2014), 被认为是沉积物中促进物质循环和微生物群落进化的重要驱动力 (Breitbart, 2012)。我国学者借助 IODP 347 航次, 成功捕捉到深部生物圈原位状态下微生物细胞内的完整病毒颗粒, 首次提供了深部生物圈病毒原位侵染、复制、组装的直接证据; 并首次实测定量了深部生物圈病毒的活性, 发现其裂解性生产力高达 $3.27 \times 10^7 - 7.57 \times 10^8 \text{ cm}^{-3} \text{ h}^{-1}$, 而溶源性生产力只占总病毒生产力的 5.83 - 33.20% (Cai et al., 2019)。

3. 发现洋壳生物圈

洋壳中的岩石体积约是海洋沉积物总体积的 5 倍 (Orcutt et al., 2011)。洋壳中流体的体积占到全球海水的 2 %，是地球上最大的含水系统(Johnson and Pruis, 2003)。这些都预示着洋壳中可能含有规模不可忽视的深部生物圈。随着采样装备和钻探技术的发展，科学家们得以获取沉积物之下的洋壳样品并发现了洋壳中栖居着微生物，对全球生物地球化学元素循环和海底地貌风化都具有潜在的重要作用(Zhang et al., 2016a; Zhang et al., 2016b)。

4. 确定深部微生物普遍长寿代谢缓慢

研究普遍指出深部沉积物中微生物细胞的活性异常低，细胞生物量周转时间 (microbial biomass turnover time) 长达百年至千年(Lomstein et al., 2012)。也有研究认为沉积物中微生物活细胞的平均周转时间只有几年到几十年，比以前推测的时间缩短了 100 倍，因此在地质时间尺度上微生物的活性会对沉积物中的元素循环产生显著影响(Braun et al., 2017)。

5. 深部生命在地球元素循环中发挥了重要功能

大量研究表明深部生命特别是沉积物中微生物在地球化学循环中发挥了重要的作用，例如甲烷，乙烷等小分子烷烃的氧化，铁，硫等元素的循环等。最近一组由深部碳观测计划 (DCO) 多学科科学家组成的国际团队探究了微生物是否会影响从地球表面进入深层内部的碳循环。研究结果表明，在俯冲带弧前盆地有着大规模的微生物矿化作用，能够把地壳俯冲时释放的 CO_2 转化为自生碳酸盐

矿物。这一发现对于理解微生物在构造尺度上如何调节缓解气候变化具有重要意义 (Barry et al., 2019)。

2023 年后研究展望：

1. 新的平台，研究工具/技术和研究手段的创建，发展与拓展

海洋深部生物圈的研究仍然还处于初步研究阶段，很多问题尚没有明确的答案，例如洋壳微生物的生物量，它们的生活空间范围，以及代谢的多样性与地球化学循环之间的相互作用等。海洋深部生物圈的研究受到很多挑战包括如细胞活性极低/细胞生长缓慢而缺少合适的研究手段等。深部生物圈的研究伴随着技术的突破和进步而不断发展，急需和亟待突破的新平台/技术/方法包括例如新的钻井平台/钻探船（更深更好的岩石取样技术）；便捷的生物污染检测和监测技术，井下原位探测/微生物分析技术，单细胞活性检测技术等；

2. 发展构造微生物学，在其概念框架下促进固体地球科学与微生物学的交叉融合

构造微生物学在整个地质年代大陆和海洋构造板块及微观断裂尺度上研究微生物生态和地球化学过程。构造微生物学这一概念的提出就是要聚焦微生物活动与构造活动过程的协同研究。这样的视角能进一步加强固体地球科学家与微生物科学家之间的交流，使得双方可以更加有效的探索和理解构造和微观尺度上的地球系统的演化与发展。中国在深海研究的快速发展和对深海钻探计划的重大投资，使其在构造微生物研究中将发挥至关重要的作用。在美国决心号和日本地球号之后，中国正在努力打造世界第三个科学钻井平台。此外，中国将于 2020 年

建成新的蛟龙号母船，进一步加强海底研究。海洋科学国家实验室（NLOS）已经计划在未来 3 - 4 年内开展与海洋钻探有关的研究活动，并使用蛟龙号进行全球考察，与此同时，其大洋钻探船将在 2021 年前完工。这些即将搭建的平台会为构造微生物学框架下的微生物学研究提供振奋人心的机会。

3. 地球“深时”环境演变与生命演化研究的进一步结合

地球“深时”环境演变特别是重大地质历史时期的环境演变与生命的演化在沉积物地层中留下了“蛛丝马迹”。利用沉积物地质载体重建古海洋生态系统结构和碳氮硫等的生物地球化学循环过程；发展新的地质生标和高分辨率同位素示踪，结合中国古生物研究的优势开展地球“深时”生命起源和环境演化研究。

4. 深部生命活动与气候变化的联系

强调地球系统的联通性，地球深部生命活动与上层海洋的联系。深海深部作为地球巨大的碳库，包括深部生物圈在内的深部各圈层之间的相互作用，势必会在不同时间尺度上对地球表层环境系统产生重要影响，发生耦联。

5. 突出深部病毒的研究

病毒在深部生物圈生态系统中可能扮演着比上层病毒更为重要的角色，然而病毒及其宿主在深部生物圈的生态功能和生物地球化学作用仍亟待探索。深部生物圈病毒的多样性、作用机制及其生态学功能，包括对极端环境的适应，微生物群落的调控及遗传信息表达传递等都需要深入研究。

6. 依托和进一步建设“国际深部生命研究中心”促进多研究主题与学科的交叉融通

2018 年在深部碳观测研究计划 (DCO) 的深部生命研究主题人员共同拥护下于中国上海正式成立了“深部生命国际研究中心”(IC-DLI, 具体见 DCO 网站新闻链接)。该中心汇聚了深部生命研究领域的国际顶级科学家, 将在深部生命这一国际地学和生物学交叉的前沿热点研究领域积极推动中外合作交流, 交叉融合和科学技术创新, 培养/增强中国青年学者的国际学术影响力。在中国面向 2023 年后依托大洋钻探的深部生物前沿研究中, 可以依托和更好建设该中心以促进多研究主题与学科的交叉融通, 综合利用和发展当前技术从深部生物描述性的研究进入多学科交叉的原位定量实验, 结合微生物学、合成生物学, 地球化学、地球物理学、水文学, 以及人工智能开展多学科综合研究。

国际大洋发现计划的组织管理与运行

中国 IODP 办公室

1. 当前国际大洋发现计划的组织管理与运行

国际大洋发现计划 (IODP, 2013-2023) 的组织管理与运行模式延续了综合大洋钻探计划 (IODP, 2003-2013) 阶段时的基本框架, 还是美、日、欧三家领导, 其他国家参与的形式, 但在具体内容上有较大的改变。IODP 的管理以三个钻探平台为核心, 综合大洋钻探计划阶段的三个科学执行机构不变, 仍然是:

“决心号”科学执行机构 (美国德州农工大学), “地球号”科学执行机构 (日本海洋研究开发机构, JAMSTEC) 和欧洲大洋钻探联盟科学执行机构 (英国地质调查局、德国不莱梅大学和欧洲岩石物理联盟联合组成)。2003 年新计划启动时制定的岩芯保管政策继续沿用, 即分别位于美国德州农工大学 (Gulf Coast Repository, GCR)、德国不莱梅大学 (Bremen Core Repository, BCR) 和日本高知大学 (Kochi Core Center, KCC) 的三个岩芯库按照海区划分的原则保管大洋钻探 50 年来的岩芯样品, 开放给全世界科学家免费使用。

在运行和管理上最大的变化是取消了统一的国际管理总部——IODP 国际管理公司 (IODP-MI), 而是由功能和人员都大幅压缩的科学支撑办公室 (Science Support Office [SSO], 由斯克里普斯海洋研究所负责) 取代, 承担建议书和井位调查数据库的接收和管理、IODP 网站管理等基本任务。钻探船/平台的航次安排和运行监督则由三个新成立的平台管理委员会 (Facility Board) 负责, 分别是

“决心号”平台委员会、“地球号”IODP委员会和ECORD平台管理委员会。上述三个平台管理委员会由国际科学家代表、科学执行机构代表和资助机构代表组成，向各自的资助机构负责。另外一个重要的变化就是资金的流向发生变化，综合大洋钻探阶段，欧盟、中国、韩国、印度、巴西、澳新等成员所缴纳的会员费主要由IODP-MI支配，很少用到钻探船/平台的运行之中。2013年开始，美国NSF经费削减，每年给“决心号”的运行经费减至4500万美元，而“决心号”每年运行8个月的费用约为6400万美元，还有较大的缺口。因此NSF想出的办法是2013年后各钻探平台采用独立运行，分别寻找财政支持的模式，于是中国、韩国、印度、巴西、澳新等参与成员加上ECORD全部加入“决心号”钻探联盟，每年缴纳的会员费1450万美元用于支持“决心号”钻探船的运行，这在美国NSF经费削减的背景下，大大改善了“决心号”钻探船的运行状况。而日本“地球号”的运行费仍然来自于日本文部省的拨款，欧洲特定任务平台的运行费由ECORD各成员国缴纳的会费承担。

IODP (2003-2013) 的科学咨询机构较为复杂，有科学规划与政策监督委员会 (SPPOC)、科学规划委员会 (SPC)、科学指导与评估工作组 (SSEP)、环境保护与安全评估工作组 (EPSP)、科学技术工作组 (STP)、工业发展工作组等多个委员会和工作组。建议书的评审流程也相对漫长，IODP-MI 负责接收来自科学家提交的建议书，然后分配给 SSEP 和 STP 分别进行科学和站位调查数据的评估，一份建议书往往通过多轮的反复修改，才能通过科学和站位调查的评估，耗时 3-5 年是常态。通过科学和站位调查评估的建议书被转到 SPC 进行科学规

划评审，排名靠前的建议书被推荐至 IODP-MI 安排航次，在航次执行之前还必须通过 EPSP 的评审。通过科学评审，等待安排航次的建议书数量保持在 30-40 份左右，而三个平台每年能执行的航次最多 6-7 个，因此能够安排航次的建议书算是十分幸运的，常有领衔建议人已退休也等不到航次安排的情况发生。

相比综合大洋钻探计划，国际大洋发现计划的科学咨询机构有了很大的变化，主要着眼于简化流程、提高效率。2013 年后的科学咨询机构通过调整合并，仅保留建议书评估组 (PEP)、站位特性组 (SCP) 和环境保护与安全评估组 (EPSP)，后来干脆将 PEP 和 SCP 合二为一，称为科学评估组 (SEP)，SEP 和 EPSP 的名额根据各国给“决心号”运行贡献的大小来分配。改革后，建议书评审的效率大大提高，建议书评审一般在 1-3 年内便有结果，要么被转移至各平台管理委员会等待安排航次，要么被终止。原科学咨询机构中 STP 和工程发展组 (EDP) 等的职能转移至执行机构 (IO)，在遇到科学技术或工程发展等方面的问题时，由 IO 召集临时小组解决。

由于 IODP-MI 取消之后，各成员国没有在整个计划层面交流沟通的平台，因此新成立了 IODP 论坛 (Forum)，其主要功能是对 IODP 的执行情况进行评估，指导 IODP 2013~2023 年科学计划得到贯彻，为各平台运行方提供建议，同时也是 IODP 各成员交流信息和交换意见的平台。IODP 论坛每年一次的会议由各成员国的科学家、资助机构、执行机构和科学管理机构的代表参加，其他大型科学计划（如 ICDP、OOI 等）及潜在的成员国可派出代表作为联络员参加 IODP 论坛的会议。这样就形成了新的 IODP 组织和管理的框架（图 1）

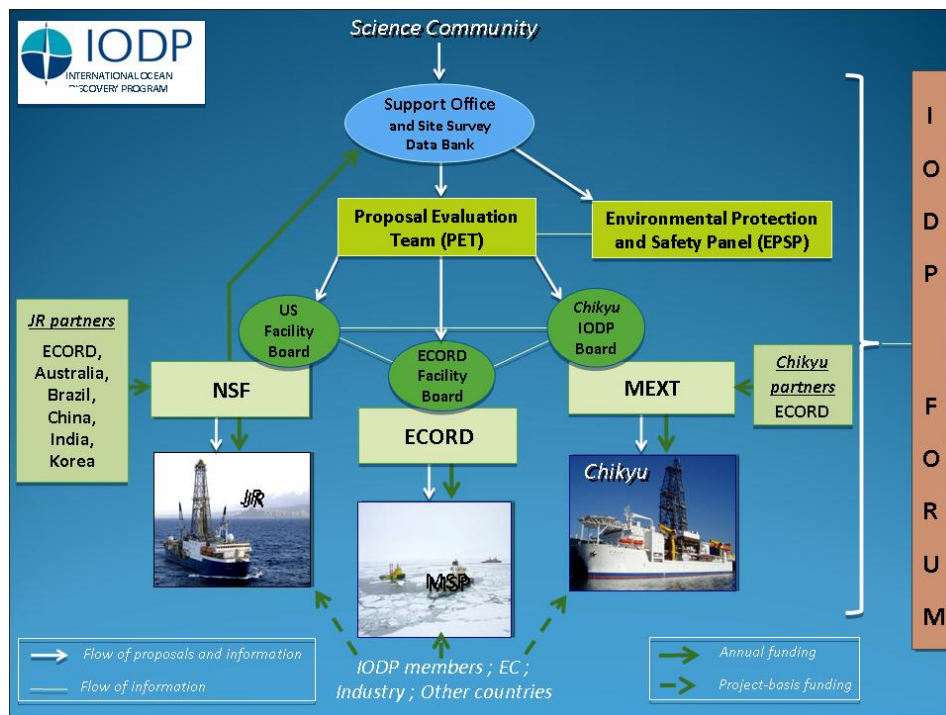


图 1. 国际大洋发现计划组织管理与运行框架

新框架下建立了科学目标统一规划、钻探任务分头实施的新机制，美国、日本和 ECORD 的三个钻探平台独立运行管理，各成员国通过分别加入这三个平台联盟的方式来参与 IODP 的科技活动。从 IODP 前 6 年的运行情况来看，新的管理机制运行良好，各平台根据自己的财政状况灵活高效地安排实施航次，其中以“决心号”运行管理最为成功。在未来的国际大洋钻探中，这种管理模式将继续沿用，新的机制也有利于新生力量的加入，如中国正在积极推进成为 IODP 的第 4 个平台提供者。

2. 中国 IODP 下一步的战略规划和举措

现阶段,我国年付 300 万美元会费加入 IODP,此外还特别支持了南海 3 个匹配性项目建议书航次 (CPP),前五年共投入经费 3300 万美元,成为仅次于美、日、欧等三个平台提供者的第四大资助方。投入的增加带来了丰硕的科研成果,通过南海 CPP 系列航次,在南海深海研究取得一系列科学发现和突破性成果,建立起我国在南海深海研究中的国际主导地位。更加重要的是全国有 30 多家单位 130 余位科学家参加了大洋钻探航次,以及上千人次的航次后研究队伍,形成了具有较大规模、较高水平和国际视野的深海科技研究队伍,一大批优秀的中青年人才已经成长起来,这为我国下一步在国际大洋钻探中发挥更加重要的作用奠定了基础。2014 年以来,中国 IODP 专家咨询委员会组织多次研讨,提出了中国参加 IODP 三步走的战略规划:

第一步:实现我国主导的南海 CPP 航次。IODP 349 航次成功实施之后,2017 年又连续实施了 IODP 367、368 航次,主导南海深海研究的同时,培养和壮大具有国际竞争力的深海科技队伍,目前第一步已顺利完成。

第二步:自主组织航次成为 IODP 第四个平台提供者。当前,美国和日本分别投入专用科学钻探船实施 IODP 航次。欧洲并没有专用的科学钻探船,而是根据不同的科学目标租船组织航次,欧洲的航次聚焦在浅水和极地海域,取得了非常突出的科学成果。在我国现阶段没有专用钻探船的情况下,应效仿欧洲的做法,尽快通过租船自主组织 IODP 航次,成为 IODP 第 4 个平台提供者,进入大洋钻探的领导层,并建设运行国际大洋钻探第四个岩芯实验室。

中国地质调查局所属的广州海洋地质调查局运行浅水钻探船海洋地质十号，并具有租船钻探经验，将承担中国大洋钻探平台运行管理的任务。中国组织的第一个 IODP 航次计划从陆架海平面变化历史入手，争取在 2020-2022 年实现南海“巽他陆架”的科学钻探。此举将使中国和美、日、欧三家并列，成为国际 IODP 的主要贡献者之一。未来中国地质调查局建造的水合物钻探船（大洋钻探船）预计 2025 年后投入使用，也将由广州海洋地质调查局负责运行，该船部分船时可用于国际大洋钻探，为中国的大洋钻探平台提供更多选择，具有在全球海域开展钻探的能力，实现更多中国组织实施的 IODP 航次。

为了落实第二步的规划，中国 IODP 专家咨询委员会已向科技部等主管部门建议中国在 IODP 后 5 年增加投入，会员费由每年 300 万美元增加到 600 万美元，培养和锻炼中国的人才队伍，在未来大洋钻探中发挥重要作用；自主组织 IODP 航次，建设运行第 4 个国际大洋钻探岩芯实验室；条件成熟时发起成立大洋钻探发展中国家联盟，吸纳广大发展中国家，特别是一带一路沿线的国家加入进来，实现合作共赢。目前上述建议正在积极推进落实中。

第三步：建造世界第三代大洋钻探船。长远来看，大洋钻探未来的挑战和突破在深部，需要在钻探技术革新的基础上建造世界第三代大洋钻探船。现有的大洋钻探船在钻探深部硬岩时都遇到瓶颈，到达海底以下 2000 余米就已举步维艰。建造国际大洋钻探第三代船，必须能够承担探索地球深部的新任务，因此只能是国际先进技术的结晶，吸取各方面的经验，集合各国的先进技术一起攻关

中国大洋钻探二十年



丁仲礼

中国科学院院士, 主要从事第四纪地质与古环境研究. 现任第十三届全国人大常委会副委员长, 民盟中央主席, 中国科学院副院长.

1998 年, 经国务院批准, 我国正式加入国际大洋钻探计划, 即现在的国际大洋发现计划. 20 年来, 我国通过参加这个计划, 取得了一系列重大科学成果, 特别要指出的是, 在南海深海探索上, 我国科学家所取得的成果尤为国内外同行所瞩目.

大洋钻探是迄今为止深海研究领域乃至整个地球科学研究历史上, 规模最大、历时最久的国际合作项目. 从 1968 年美国钻探船在墨西哥湾进行深海钻探开始, 50 年来大洋钻探的规模和水平节节攀升. 到现在为止, 在全球各大洋已钻井 3700 余口, 取芯 40 多万米, 开辟了探索地球深部的有效途径, 推动了地球科学的革命性进步. 比如, 大洋钻探确立了地球构造运动的板块理论, 证明了全球气候冰期-间冰期演变的轨道控制假说, 发现了海底深部生物圈和天然气水合物, 揭示了大洋岩石圈的成矿机制, 完全可以说, 这个国际合作项目改变了地球科学的发展轨迹. 2018 年正值国际大洋钻探 50 周年, 我们进行总结和展望具有特殊的纪念意义.

中国加入大洋钻探合作项目, 虽然相对较晚, 但中国的加入, 无论在国际上, 还是在国内, 都具有历史性意义. 大洋钻探船好比深海研究的航母, 大洋钻探活动好比深海研究的奥林匹克, 是各国实力展现和较量的平台. 中国是第一个加入大洋钻探的发展中国家, 但是随着经济力量的增强和海洋科学的发展, 目前已经成为最有活力的国家之一. 从 1998 年缴纳 1/6 成员费起步, 到 2013 年成为每年缴纳 300 万美元的全额成员, 加上近年来提供了 3 次大洋钻探航次的配套经费, 使得中国在大洋钻探中的贡献和国际地位大幅度上升. 2014~2017 年的 4 年里, 我国有 84 位科学家上船参加航次工作, 占“决心号”上船科学家总数的 15%, 这个规模仅次于美国. 我们以南海为重点参加大洋钻探计划, 20 年来实现了 4 个航次, 共钻探 17 个站位, 其中 11 处水深超过 3000 m, 取回岩芯近万米, 其中 6 处钻进了岩浆岩基底. 这 4 个南海航次, 都是在中国科学家的建议和主持下实施的, 通过钻探取得了南海形成演化历史的新认识, 对于套用大西洋模式建立起来的流行观点提出了竞争性新模式, 从而使南海成为全球研究程度最高的边缘海盆地. 因此, 我们可以自豪地说, 通过短短的 20 年时间, 我国已在国际深海大洋研究上迈出了坚实的步伐.

回顾过去, 我们深深感到: 南海大洋钻探的成功, 依靠的是国家的重视, 依靠的是各部委的大力支持, 依靠的是国内各部门的通力合作. 没有中国海洋石油公司和中国地质调查局的积极配合并提供地震剖面资料, 南海大洋钻探的建议不可能获得批准; 没有科技部积极筹措配套经费支持 CPP 航次, 通过评审的建议书也不可能这么快安排航次; 没有外交部、原国家海洋局等大力支持, 美国钻探船也不可能到我国海域来实施钻探.

当前, 强化我国对国际大洋钻探的投入、提高在国际合作中的地位, 是我们建设海洋强国、加速发展深海科技的有效途径. 按照我国大洋钻探专家咨询委员会提出的战略部署, 2018 年开始的目标就是争取我国成为继美国、日本和欧洲联合体之后, 国际大洋钻探的第 4 个领导成员. 为此, 我们正积极准备在南海南部

的巽他陆架, 由我国出船执行大洋钻探航次, 为国际大洋钻探建造第4个岩芯库; 同时准备由我国发起主办国际大会, 为2023年后大洋钻探科学计划的制定进行科学准备. 最近, 我国决定建造的天然气水合物钻采船将有一部分大洋钻探的功能, 这必将进一步增强我国对国际大洋钻探的贡献能力.

国际大洋钻探已经起步50年, 尽管我国的大洋钻探迟到了30年, 但是我们通过20年的努力就基本赶上了深海科学的国际前沿. 相信, 只要我们能够继续群策群力、不骄不馁, 可能再用不到20年, 我国就可望在大洋钻探和深海科学领域真正进入国际先进行列. 同志们, 让我们继续努力, 无愧新时代的伟大召唤, 争取早日实现成为海洋科学强国的既定目标!

本文为作者代表中国大洋发现计划专家咨询委员会, 在“中国大洋钻探二十年学术研讨会”上的开幕词, 略有修改.

丁仲礼

中国科学院



大洋钻探五十年: 回顾与前瞻

汪品先

同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

现代地质科学产生以来的两百多年里, 二十世纪的六七十年代算得上是个英雄时期: 以板块学说为标志的地质革命, 横扫长期以来的陈旧观点, 开创了地球科学的新纪元, 而大洋钻探就是这场革命中的一面旗帜. 世界各国将科技的精华集中到钻探船上, 半个世纪来在世界各大洋深水底下钻井四千多口(图 1), 取芯四十多万米, 从根本上改变了人类对地球的认识, 扭转了地球科学发展的轨迹. 从组织的角度看, 大洋钻探也是国际科学史上的奇迹: 一项由各国政府出资的基础研究国际计划, 居然能历经 50 年而不衰, 学术上的青春活力不减当年, 相信其中必有缘故.

这缘故就在于海洋的深邃广袤. 深海是地球表面的主体: 全球陆地面积加起来还不到三成, 水深超过 2000 m 的深海却占了六成. 现在的人类 90% 挤在 10% 的陆地上, 奢谈着地球的可持续发展, 而对于决定地球未来环境的深海却往往视而不见. 大洋钻井犹如一枚枚神针穿越深水插入地球, 捅破了深海之谜: 认识了海底扩张, 才懂得大陆山系的由来; 解读了海底沉积, 才找到气候演变的根源. 50 年来, 深海始终是地球科学创新的源泉^[1].

在大洋钻探的国际队伍里, 中国只是个“新兵”. 但是我们赶在 20 世纪落幕前加入其中, 经过砥砺奋进, 集中在南海深水实现了 4 个钻探航次, 使之一举成为海底深部研究程度最高的边缘海, 中国也因而成为国际大洋钻探最为活跃的国家之一. 大洋钻探从 1968 年开始, 中国在 1998 年加入, 2018 年是大洋钻探国际 50 年、中国 20 年的双重喜庆. 值此欢庆之际, 需要对大洋钻探国际合作的曲折道路, 对其科学发现的学术价值, 和我国参加以来的经历进行回顾, 对于大洋钻探的未来和我国进入其领导核心的道路进行分析, 这是撰写本文的目的.

1 一波三折: 大洋钻探的国际之争

科学道上无坦途, 大洋钻探也不是个“顺产儿”. 它的前身是美国的“莫霍计划”, 试图从深海底下打穿地壳, 穿越地壳和地幔之间的“莫霍面”. 从 1960 年开始经过种种试验后, 终于在 1966 年被撤销, 夭折的原因是技术上尚未成熟、经济上不胜负担, 其实莫霍钻的技术难点至今仍未解决. 1968 年“格罗玛·挑战者号”首航墨西哥湾, 开始了美国的“深海钻探”计划(DSDP)(表 1), 实质上就是将钻探玄



汪品先 同济大学海洋与地球科学学院教授, 中国科学院院士. 长期致力于推进我国深海科技的发展. 1999 年在南海主持中国海首次大洋钻探, 现主持国家自然科学基金“南海深海过程演变”重大研究计划.

武岩的“莫霍计划”改变为钻探其上的沉积岩^[2]. DSDP 一路顺利, 从 1968~1983 年, 15 年里完成了 96 个航次, 钻探 624 个站位, 取芯约 95000 m, 并且不断带来新发现. 第一个航次就在墨西哥湾一千多米水深下发现石盐层, 而盐层底下的石油正是今天的勘探对象; 第三个航次在大西洋发现海底地壳的年龄从洋中脊向外变老, 从而证明了板块理论的海底扩张假说^[3]. 深海钻探的成功引起了各国的注意, 1975 年苏联、英国、德国、日本和法国先后加入美国的计划, 使得深海钻探进入“大洋钻探国际阶段(International Phase of Ocean Drilling, IPOD)”, 成为举世瞩目的国际计划. 从此之后, 大洋钻探就超出了科学领域, 成为国际外交上一个新的敏感主题. 比如 1979 年底苏联出兵阿富汗, 1980 年以美国为首的深海钻探计划就剥夺了苏联的参与权利, 直到现在俄罗斯也不是大洋钻探的成员.

1985 年大洋钻探开始了被称为“ODP”的第二阶段(表 1), 美国的钻探船也作了更新: 10500 吨的“格罗玛·挑战者号”, 换成了近 17000 吨的“JOIDES 决心号”, 设备更加先进. 大洋钻探的难度极大, “决心号”钻探船靠的是 12 个动力定位的强力推进器, 和 400 吨的升降补偿装置, 才能保持稳定、进行钻探^[2]. 跨越世纪的 ODP 阶段, 大洋钻探在 20 年里完成 111 个航次, 在 669 个站位钻井, 取回岩芯 223000 m, 发表国际论文 7200 篇. 辉煌的成绩强化了美国领导下大洋钻探的国际地位, ODP 末期参加的国家 and 地区达到 22 个, 成为各国科学家合作与竞赛的深海奥林匹克^[4]. 同时也不难想象, 国际主导权之争也就随之而来.

20 世纪在美国和欧洲联合体之外, 长期发展深海科技的只有日本, 在 80 年代经济达到顶峰的背景下, 海洋上

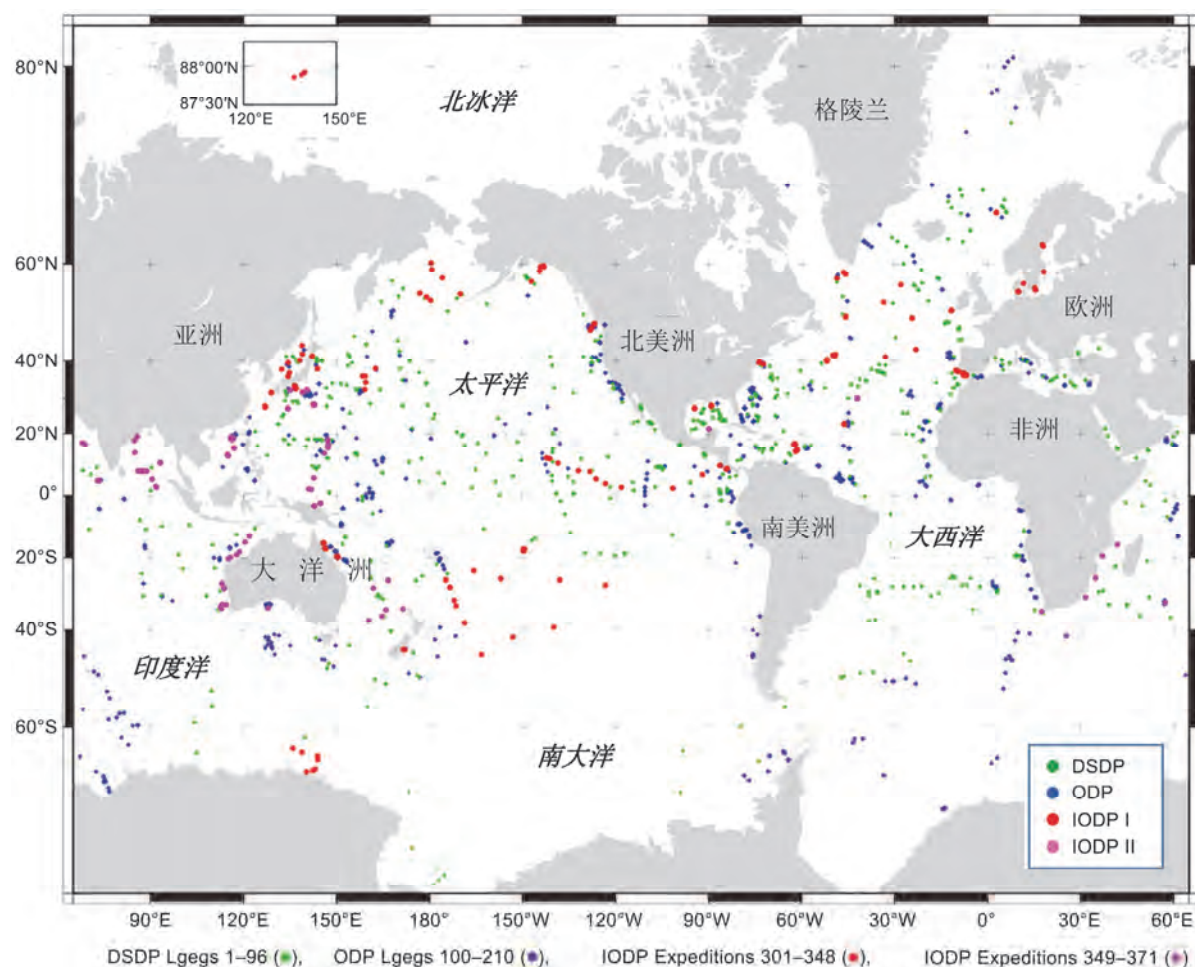


图1 大洋钻探50年钻井位置图。颜色表示不同阶段的钻井(表1)。http://iodp.tamu.edu/scienceops/maps/iodp_odp_dsdp.jpg

Figure 1 Ocean drilling sites over 50 years. Colors distinguish drill sites of different phases (Table 1). http://iodp.tamu.edu/scienceops/maps/iodp_odp_dsdp.jpg

表1 国际大洋钻探的4个阶段

Table 1 Four phases of the international ocean drilling program

名称	年份	钻探平台	参与国家
DSDP 深海钻探计划 (Deep Sea Drilling Program)	1968~1983	美国“挑战者号”	从美国扩展到英国、法国、日本、苏联和德国
ODP 大洋钻探计划 (Ocean Drilling Program)	1985~2003	美国“决心号”	美国主导, 扩展到 22 个国家和地区
IODP I 综合大洋钻探计划 (Integrated Ocean Drilling Program)	2003~2013	美国“决心号”、日本“地球号”、欧洲联合体“特定任务平台” ^{a)}	美国、日本、欧洲联合体 ^{a)} 、中国、韩国、印度、巴西、澳大利亚-新西兰联合体
IODP II 国际大洋发现计划 (International Ocean Discovery Program)	2013~2023		总共 20 多个国家和组织

a) 欧洲联合体目前包括德国、英国、法国、意大利等 17 国和加拿大, 通过租船方式提供特定任务平台

问鼎世界的意图十分强烈。1993 年 12 月, 日本大洋发展委员会正式向首相递交报告, 提议建造大洋钻探船, 挑战国际领导权。1994 年日本制定了“OD21”(21 世纪大洋钻探)计划, 直言“在大洋钻探领域里, 30 年来一直是美国起着领导作用。而 21 世纪的大洋钻探, 应当有别的国家也有兴趣起

这种倡导作用”。接着日本政府决定建造新一代的大洋钻探船, 亦即立管钻探船。美国大洋钻探打的是裸眼钻, 不下套管、不用泥浆, 因此井深不能超过 2000 m。日本船可以进行有泥浆循环的“立管钻探”, 井深可以加到 7000 m, 与此相应船体也加大到 57000 吨(图 2), 总花费远超过 5 亿

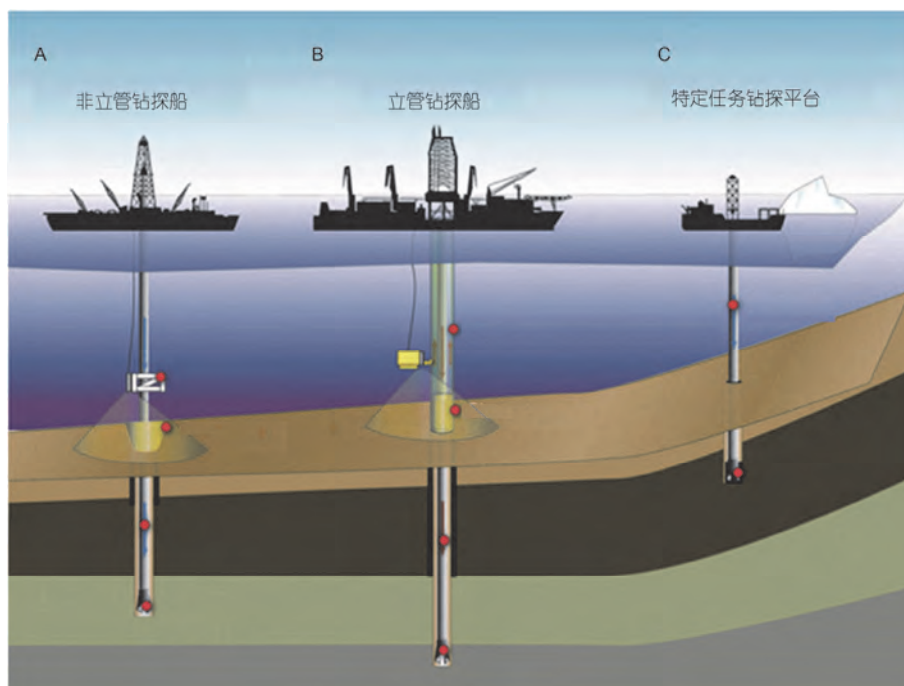


图2 大洋钻探 IODP 阶段的三大钻探平台. A, 美国“决心号”非立管钻探船; B, 日本“地球号”立管钻探船; C, 欧洲联合体租船提供的特定任务钻探平台(据 IODP 网页)

Figure 2 Three ocean drilling platforms in the IODP phases. A, Riserless drillship “JOIDES Resolution”, USA; B, Riser-equipped drillship “Chikyu”, Japan; C, Mission Specific Platforms, European Consortium. Based on IODP website

美元的预算, 实际投入可能高达 8.5 亿美元. 21 世纪出现的日本大洋钻探船, 标志着深海科学钻探能力的更新, 更是日本国际地位的跃升. 2002 年初钻探船下水仪式由日本公主剪彩, 并且向全国征集船名, 最后在收到的 9076 份建议中, 特意选一位小学四年级学生作为“地球号”的正式提名人. 2005 年“地球号”建成交付使用, 2007 年 9 月“地球号”驶向日本东部太平洋海域钻探深海发震带, 向全世界宣布其最终目标是要“打穿地壳”, 学术界也举世欢庆这场海上科学盛典的来临.

与美国、日本不同, 欧洲多国在 21 世纪里是集体参加大洋钻探的, 以德国、英国、法国为首的欧洲联合体 (European Consortium) 是大洋钻探第 3 个核心. 面对着美国、日本的大洋钻探船, 欧洲联合体的对策是另辟蹊径, 采用租船打钻的办法, 专攻大洋钻探大船打不了的海底, 比如北冰洋、珊瑚礁, 这样不用花大钱就能点燃学术亮点, 叫做“特定任务平台 (mission specific platform)”. 于是大洋

钻探进入第三阶段 (IODP, 2003~2013 年, 表 1), 从美国的 1 条钻探船变成 3 个钻探平台, 出现了空前的繁荣期. 可惜事与愿违, 大洋钻探的高潮期没有维持几年, 就逐渐冷落下来. 在 2014~2017 年的 4 年里, “地球号”总共只在 2016 年执行过两个大洋钻探航次, 其他 3 年处于停顿状态, 国际大洋钻探计划几乎全靠一条美国钻探船在执行 (表 2), 与 10 年前“地球号”出航时的盛况大相径庭^[5]. 是什么因素影响了“地球号”在国际大洋钻探计划中的活动?

问题首先来自运行经费. 与“地球号”设计和建造时的 20 世纪 90 年代相比, 原油价格在 21 世纪前 10 年就翻了两番, 航次成本的暴涨使原定的预算计划落空; 而金融危机和财政困难, 又使得政府支持力度大幅度下降, 于是出现了造船容易用船难的局面. 同时发生的是技术问题, 10 年来“地球号”始终在日本东部深海钻探发震带, 但是这些年黑潮的位置也总保持在该区流经, 湍急的海流给钻探带来了多次伤害. 更大的伤害来自 2011 年的日本东北大海啸,

表 2 美国、日本、欧洲联合体三家钻探平台执行国际大洋钻探航次的数目

Table 2 Number of international ocean drilling expeditions implemented by the USA, Japan and European Consortium

年份	美国“决心号”	日本“地球号”	欧洲联合体“特定任务平台”	合计	美国: 日本: 欧洲联合体组织航次所占比例
2003~2013	30	13	5	48	1:0.43:0.16
2014~2017	20	2	3	25	1:0.10:0.15

灾害发生时“地球号”正抛锚在附近岸外,被撞上码头严重受损。日本是个地震多发国家,建造“地球号”的首要应用目标是钻探海底下 7000 m 处的发震带,以揭示机制、预测地震,但是 10 年来才打了 3000 m,离俯冲板块发震带的目标还十分遥远。至于打穿地壳的“莫霍钻”,“地球号”10 年来钻探实践的表明技术条件并不成熟,要实现建造时提出的口号并不容易。

另一方面的问题来自国际关系。大洋钻探是地球科学界规模最大的国际计划,而领导权是任何国际计划不容回避的问题。日本钻探船比美国的大、投入也比美国多,从 2003 年开始,理所当然地要与美国分享大洋钻探的领导权。先是在华盛顿和东京各设一个国际大洋钻探总部,后来应日方要求,把华盛顿的总部合并到东京。但是美国很快提出两国共同管理的效率太低、费用过高,于 2013 年突然单方面宣布“分家”——撤销大洋钻探总部,改为两条钻探船由美国、日本两国分头经营,同时保留“大洋钻探”科学总计划不变。此举使日方十分被动,结果世界各国都参加美国“决心号”船的大洋钻探,只有少数成员象征性地缴少量费用参加日本“地球号”的大洋钻探,实际上又回到了原来由美国一家主持的局面。日本 20 多年前斥巨资造大船、争取国际领导权的计划,陷入了进退两难的尴尬境地。

当然,美国和欧洲联合体也都各有难处。比如在 2014 年前的 10 年里,美国国家基金委员会(National Science Foundation, NSF)的预算减少了 10%,而大洋钻探(IODP)和海底观测网(OOI)为主的海洋学科重大基本设施的支出,同期里反而增加了 18%,使得可供海洋科学研究用的经费大为减少,科学家申请基金的成功率急剧下降。情况告急,美国国家研究理事会(NRC)赶紧请 21 位科学家加以评审,在 2015 年提出报告,建议大洋钻探投入减少 10%、观测网减少 20%,用来填补科研经费的短缺。处在经费危机下的 NSF,提出了“匹配性建议项目(complementary proposal project, CPP)”的形式,为大洋钻探的运行谋求外来资助:如果建议国同意补交经费,钻探航次就可以提前安排,于是中国、印度和巴西,都通过 CPP 的途径实现了各自岸外的航次。至于欧洲联合体,也由于财政拮据,减少其原定组织的航次,也就是减少了投入(表 2)。这种局面,其实就是近年来国际经济重心转移,新兴国家实力上升的一种反映,客观上为我国进一步“出手”准备了条件^[6]。

2 石破天惊:大洋钻探的科学发现

尽管道路曲折,大洋钻探半世纪的学术贡献却是历史性的。50 年来,大洋钻探作为深海探索的世界航母,始终引领着世界地球科学,以其新发现改变着地球科学各个领域的发展轨迹。人类对深海底下的了解太少,纵然每个航次的效果不一,有的立竿见影、有的要等多年分析,但都为地球科学知识库增添了耀眼的珍宝。大洋钻探早期的

贡献集中在板块学说和古海洋学两大方面,曾被比喻为大洋钻探产生的“双胞胎”^[7],而且至今仍在茁壮成长,值得分别加以说明。

一部大洋钻探史,满载着来自深海底的意外发现。DSDP 初期的航次,就在证实海底扩张的同时发现了大洋地壳的年龄新得出奇:地球年龄有 40 多亿年,大陆地壳平均有 20 多亿年,而大洋地壳却最老只有 2 亿年。原来大洋的底板是一边扩张新生、一边俯冲隐没而不断更新着的,于是大洋成因的谜底开始浮出水面^[8]。至于大陆究竟如何裂开变成大洋,大洋钻探进一步瞄准了大陆边缘寻求答案。尤其是在北大西洋欧洲岸外的伊比利亚边缘,21 年里组织了 5 个航次在 16 个站位钻探基底,终于揭示出地壳破裂、海水下渗、地幔蛇纹岩化的大陆岩石圈破裂过程,发现大陆破裂有着自下而上的“富岩浆型”和自上而下“贫岩浆型”两种模式^[9]。这类发现含有巨大的潜在经济价值,因为世界的大油田主要形成于大陆张裂的早期,张裂过程的认识为含油盆地的勘探提供了理论基础,于是被奉为所有被动边缘的圭臬;直到最近南海大洋钻探的结果,才对其普适性提出了挑战^[6,10]。

地幔是地球的主体,占据地球体积的 4/5、质量的 3/4,然而人类至今没有能够穿过地壳,一睹原质地幔的真面目,而这正是“莫霍计划”的初衷。时至今日莫霍之梦未圆,而学术界对“莫霍面”的理解已经大不相同。洋壳在大洋中脊产生,但是大洋中脊的扩张速率快慢不一,快速的如太平洋每年 10~20 cm,大西洋每年 2~4 cm,而超慢速的西南印度洋每年扩张不足 2 cm,那里的莫霍面不见得就是地壳和地幔的分界,也有可能是地幔岩蛇纹岩化的下界。因此,大洋钻探一方面积极筹备,在东太平洋选择洋壳最薄的地方实施原来意义上的莫霍钻;另一方面又设立了“慢速莫霍计划(SloMo)”,探索西南印度洋的另类“莫霍面”^[11]。

至于古海洋学,就是利用大洋钻探取得的沉积岩芯,通过分析追溯大洋海水和气候环境的演变历史。最早的戏剧性发现是“地中海变干”事件:1970 年 DSDP 第 13 航次在地中海的深海底,钻到了石膏和岩盐的蒸发岩层,说明 600 万年前由于和大西洋的通道切断加上干旱气候,地中海从深海收缩为盐池,水面低于大洋数千米,经过 30 万年之后才和大西洋恢复联通,重返深海景观^[12]。同样惊人的发现来自北冰洋:2004 年大洋钻探用破冰船钻入北冰洋海底,发现北冰洋在五千万年前原来是个湖泊,湖面漂着淡水浮萍满江红,属于亚热带气候,而且湖水肥沃,沉积物里的有机碳含量超过 5%,是个理想的生油环境^[13,14]。大洋钻探为重大的地质灾难事件提供证据,比如白垩纪末小行星撞击事件导致恐龙灭绝,大洋钻探先在大西洋深海沉积中找到了撞击事件产生的铱异常,最近又在墨西哥岸外钻探希克苏鲁伯(Chicxulub)陨石坑,直接为撞击事件取得了现场物证^[15]。

在古气候方面,大洋钻探揭示地质历史上暖期气候的情景,在当前全球变暖的威胁下显得尤为珍贵。比如钻探大西洋追溯 5500 万年前海底温室气体溢漏引起的高温事件,在不过 2 万年的时间里,就有 2 万亿吨的甲烷从水合物中释出,使得水温上升 5~9℃,同时引起海水酸化,海底碳酸盐软泥突然变成红黏土^[16]。近期的例子来自加利福尼亚岸外圣巴巴拉盆地的纹层沉积,由于较暖的中层水流入盆地使海底可燃冰溶解、甲烷释出,引起水底缺氧,造成了千年尺度的周期性纹层沉积^[17]。这些不同时间尺度的深海记录,都为未来地球可能出现的暖室气候灾害,提供了预警实例。

在 DSDP 和 ODP 辉煌成就的基础上,2003 年大洋钻探迎来了 IODP 的新阶段(表 1),再度带来了学术上的新意。进入 21 世纪以来,地球科学在跨越圈层研究“全球变化”的基础上,又进一步向地球深部推进,地球表面与内部过程相结合形成新颖的地球系统科学,被称为“行星循环(planetary cycle)或者“地球连接(Earth connection)”,作为鲜明标记贯穿在 2013~2023 年的 IODP 科学计划之中^[18]。如果说板块理论的证明是大洋钻探的早期目标,那么现在又进一步意识到:板块运动其实是地幔环流在地球表层的表现,属于“行星循环”的表面部分。“行星循环”的重点在两方面:一方面是向下的俯冲带,另一方面是向上的洋中脊和可能由地幔柱产生的巨型火成岩省,介于两者之间的板块运动,其实是这大循环中的一部分。俯冲板块将物质、能量从表层带入深部,改变着地幔的成分^[19];地幔物质又通过洋中脊和地幔柱进入地球表面,改变着海水和大气的成分,将地球内部的能量释放到表层^[20],这就是表层与深部的相互作用,也是 IODP 许多航次的主题。

大洋钻探至少有 10 个航次探索过巨型火成岩省(large igneous provinces),这是基性岩浆侵入或者喷发形成的巨大地质体,既可以是陆地上印度德干高原、四川峨眉山之类的溢流玄武岩,也可以是洋底高原,其中最大的一个是西南太平洋的翁通-爪哇大火成岩省,现在面积接近青藏高原、体积超过两个南极冰盖,当时可能更大。这类大火成岩省的根基在地球深部,推测是地幔柱的产物,而其影响遍及地球表层^[21]。翁通-爪哇海底高原的形成,就曾诱发了白垩纪中期全球的海平面上升和大洋缺氧事件,沉积了深海大洋的黑色页岩。再说大洋中脊绵延 6 万千米,是地球上最大的山脉,又是地球内部物质和能量的窗口,数以百计的海底热液系统分布在这里,将地球内部产生的 25%~30%的热量向外输送;海水中多种元素在这里与地球内部发生交换,直接影响到海洋生物骨骼的成分和生物演化的进程。至于大洋的板块俯冲带,不但是地震灾害的源头——地震带的所在,也是地球表面物质返回地球内部的主要渠道,是研究大陆地壳来源和大洋水演变的关键环节。学术界提出了“俯冲带加工厂”的概念^[22],把俯冲带比喻为一个几乎是“零排放”的工厂,原料是大洋壳和大洋沉积,

产品是岩浆和大陆壳,而生产过程的“废品”就是经过脱水和熔融过程后俯冲到地幔深处的板片。

“行星循环”影响地质环境的途径,主要是地球内部和表层的水循环和碳循环,因此构成了大洋钻探新阶段的重点研究方向。现在知道,地球有着内外两个水储库,表层系统以液态的海水(H₂O)为主,地球内部以地幔矿物的羟基(-OH)为主,所以说有“海底下的海洋”,属于大洋钻探的目标之一。对于地球深部的碳循环,我们的知识比水循环更少。与水不同,地球的碳储库主要在其内部:岩石圈的碳比地球表层多出将近 2000 倍,而地幔的碳储库又比岩石圈高出十几倍,因此地球深部碳储库有一点风吹草动,都会影响地球表层的环境^[23]。大洋钻探发现的“可燃冰”和“深部生物圈”,虽然触及的只是地球内部碳储库的顶面,所产生的资源环境效应已经不容低估^[18]。

限于篇幅,本文有意绕开了“深部生物圈”的重要话题,这是个正在成为大洋钻探最新亮点的新领域,有待以后专门讨论,因为生命过程与物理过程的结合,很可能是地球系统相互作用的最顶层。总之,大洋钻探 50 年的科学发现已经渗透到地球科学的各个领域,影响着各个学科的发展方向,产生了巨大的辐射效应。尤其是进入 21 世纪以来,地球表层和深部之间的闸门正在打开,地球科学又以全新的姿态在向前发展,格外凸显出大洋钻探计划科学引领作用的威力。

3 奋起直追:攀高峰进入前沿阵地

1968 年美国开始深海钻探,而当时我国的科学界正深陷在文革灾难之中,对境外的发展一无所知。直到 20 世纪 70 年代文革后期,尽管“文攻武卫”的硝烟未散,板块学说却通过傅承义、尹赞勋、李春昱等老前辈的翻译在中国悄然传开,而随着板块学说又传来了“大洋钻探”的新名词。抚今忆昔,当时这类外国科学的前沿,对于“隔世”数十年的中国人来说就像神话一样遥远。中国参加大洋钻探的意愿,直到 20 世纪 80 年代才产生。随着 ODP 新阶段的逼近,通过海外地质学家许靖华等人的介绍,中国参加大洋钻探国际计划的呼声越来越高,“大洋钻探委员会”被组织起来进行推动。但是在当时严重缺乏外汇的情况下,每年 50 万美元的参与成员费简直是天文数字。又经历 10 年,经过十多位院士上书,终于在 1996 年获得国务院批准参加。接着又克服了美国军方的无理干扰之后,中国才于 1998 年正式加入大洋钻探国际计划,至今正好 20 周年。

值得庆幸的是,我国当时提出钻探南海追溯东亚季风演变的建议书,在 1997 年全球建议书的评比中以第一名的优势脱颖而出,立即被安排为 ODP 184 航次,于 1999 年春在南海实施,于是在中国科学家提议、设计和主持下,实现了中国海域首次的深海科学钻探^[24]。当然,南海首次大洋钻探亦非一帆风顺。按计划,第一口钻井应当打在南沙海域的深水区,就在大洋钻探船进入南海之前,当地出

现了海盗事件。当时美国船长以安全为由向全体宣布，船只改道直奔东沙，放弃南沙井位。全靠当时我国科学家严正交涉、坚持原定计划，并得到我国主管部门的有力支持，发电告知“中国方面将关注你们航次”的情况下，南沙深井终于开钻，并且在开钻时美国船长下令，在船上升起中国国旗。迄今为止，这是南沙唯一的深海井，也是 ODP 184 航次里科学成果最多的一站。20 年前大洋钻探首航南海，采集了 5000 m 的深海岩芯，取得了西太平洋区最佳的长期沉积记录，发现了气候演变长周期等多种创新成果，使我国一举进入国际深海研究的前沿。尽管只是两个月的航次，大洋钻探为我国地球科学注入了新鲜活力，从南海取得了 3000 万年来的深海连续记录，成为西太平洋地区最好的深海地层记录^[25]。大洋钻探也为南海的资源勘探提供了地质基础，为 21 世纪进军深水油气盆地进行了学术准备。

在成功赶上 20 世纪大洋钻探尾声之后，我国对南海深部的研究在 21 世纪里乘胜前进。2011 年初，国家自然科学基金委员会启动“南海深部过程演变”重大研究计划，这项为期 8 年的计划是我国第一次大规模的深海基础研究，动用大洋钻探当然是最有效的探索手段。南海深部最大的奥秘，莫过于其形成机制，而只有穿过几千米海水和深海沉积，才能钻取上岩浆岩的基底，追溯大陆破裂、海盆出现的过程。为此，“南海深部计划”组织了多次国际和国内的研讨会，递交了多份钻探建议，争取大洋钻探船再来南海，揭开其成因之谜。但是国际计划并不按照我们意愿，更何况中国在大洋钻探里涉足不深，缴纳经费也还不及当时国际总预算的 1%，多年来世界各国有多少份已经通过的钻探建议书在等待实施，想要大洋钻探再来南海又谈何容易。

然而我国科技投入的增加和美国 NSF 经费的困境，却从客观方面为我们创造了机会。2013 年 IODP 新阶段开始，中国从大洋钻探的参与成员升级为全额成员，美国 NSF 又推出了 CPP 的新政策，建议国可以通过增加经费投入使得申请航次优先安排。就这样，经过我国学术界在业务上通力协作，在程序上抓住国际机遇，在国家财政的大力支持下，居然接连实施了南海 3 个半大洋钻探航次，集中探索深海盆的基底^[6]。我国先后由 3 位专家担任首席科学家，上船科学家总数达 38 人次，空前增强了中国在大洋钻探中的份量。在 2013~2017 年间，我国参加美国“决心号”和欧洲联合体“特定任务平台”航次的科学家总共 84 人次，占“决心号”上船科学家总数的 15%，人数仅次于美国，高居国际第二位。

经过前后 4 次的大洋钻探，南海正在成为地质演化过程全球研究程度最高的边缘海。进行过大洋钻探的海洋很多，但是大多只钻探沉积层，很少能探索基底。尤其是通过多个航次钻探基底，从裂谷作用开始追踪到洋盆消亡完整历史的，南海是第一个。目前航次后的分析工作正在紧锣密鼓加紧进行，现在谈论研究结论为时尚早。但是从初步结果判断，大洋钻探的结果可望挑战国际学术界关于南

海成因的主流观点，进而为边缘海的演化机制开拓了新视角。总之，中国参加国际大洋钻探的 20 年里，对外不断增强参与力度和国际影响，对内又推动着地球科学界整体向深海拓展。截至 2018 年 9 月，我国已有 34 个单位的 130 位科学家参加了大洋钻探航次，其中包括国家杰出青年科学基金获得者 13 人，优秀青年科学基金获得者 8 人，形成了一支能够直接面对国际竞争的深海科研队伍。他们在国际刊物上发表第一作者的文章超过 420 篇，估计还有近百名研究生以大洋钻探为题撰写论文。可以大胆断言：“近年来，我国已经成为大洋钻探活力增加最快的国家”。

4 展望未来：抓机遇促进科学转型

当世界各国为大洋钻探“知命”之年做寿的时候，不免也会产生一个疑问：大洋钻探还能继续多久？在这里我们不想为一项具体的国际合作计划“算命”，能够推测的是大洋钻探在科技层面的未来。无论是为了资源还是环境，人类必然要向地球深部进军，大洋钻探必定首当其冲。人类在应对“上天、入地、下海”三大科技挑战中，“入地”的成绩最差：相对于地球半径，最深的矿井不及其 1%，最深的钻井不及其 2%。深海海底是离地球内部最近的地方，从深海海底打钻，至今还是人类直接探测地球内部无可替代的高效途径。大洋钻探既下海又入地，面临的是双重挑战，然而正是依靠各国科技界的共同努力，才能在半个世纪里谱写出彪炳史册的科学华章。大洋钻探既然要求长期持续的大量经费投入，始终保持最前沿的科技水平，也只有通过国际合作才能胜任^[4]，这就是我们推测大洋钻探光明未来的依据。

大洋钻探 50 年成功的要诀在于与时俱进。每个阶段的科学计划不但提出新的科学目标，同时还引入新的技术。就当前而言，面对莫霍钻一类的硬岩石钻探任务，科技界正在探索第三代大洋钻探船的技术前景。比如将钻机直接投到海底、将泥浆泵安置海底的新型钻探技术，已经初步实现；而面对高温高压的地质条件，钻具材料都需要从金属更改为碳材料，所有这些都是高新技术的发展空间。从战略层面看，年逾半百的大洋钻探计划的内部结构也有待改造。经过 50 年的钻探，大洋钻探初期那种科学目标简单、技术难度不高，可以“一钻定天下”的站位已经越来越少，仅靠钻探单一手段解决科学问题的时代正在消逝，而与深网观测、深潜探索相结合的“三深”技术，正在成为未来大洋钻探的新形式。比如说，多年来在钻井中设置“海底井塞”，对海底下液体流动和地壳运动进行长期实时监测，甚至进行微生物培养实验，就是大洋钻探成功的一例。欧洲几年前提出“深海与海底科学前沿”(deep sea and sub-surface frontiers, DS³F)计划^[26]，体现了“三深”结合的新思路，就值得我们在向深海进军中密切注意。

在做出科学贡献的同时，大洋钻探 50 年也为大型科学国际合作，积累了宝贵的精神财富。就个人而言，每个

航次船上两个月里的同舟共济,为世界各国不同专业的科学家营造了独特的交流空间,给他们留下终生难忘的学术经历。就整体而言,50 年经过 4 个阶段的学术规划,255 个钻探航次的论证和组织,大洋钻探从战略研讨到管理运作的各个层面,都为国际科学史留下了珍贵的经验教训。回顾起来,大洋钻探最重要的特色在于其学术的前瞻性和开放性。大洋钻探航次的选择,由各国科学家共同投票择优录取;大洋钻探的科学计划,必须得到世界公认。这样的计划只能由国际学术界共同制定,在这里任何国家的盲目自大都无济于事。就经费而言,随着世界经济格局的变化,各国对大洋钻探的投入也此起彼伏。然而各国在大洋钻探中投入和产出的相对比例,却大相悬殊,值得指出的是荷兰和澳大利亚,都以少量的投入取得重大的收获。其中澳大利亚得益于地理位置,因为南半球的大洋是国际钻探的热点;而荷兰主要依靠人才,少量人员的参加换来了重大的研究成果。在这场半世纪的国际深海科技竞赛中,中国迟到了 30 年,比美国、日本和欧洲联合体的资历浅得多。但是决心建设海洋强国的中国人,正以初生之犊的勇气和后来居上的雄心,抓住历史机遇试图问鼎大洋钻探的科学顶峰。与此同时,我们又必须脚踏实地、胜而不骄,认真研究和吸取 50 年来的国际经验,避免陷入前人的误区。

围绕“建设海洋强国”的目标,我国必将在国际大洋钻探中发挥更大的作用,当务之急是以平台提供者的身份进入参加国的核心层^[6]。与此同时,我国还需要从战略高度全面考虑在这项国际大计划中所起的作用。比如随着海洋科学的发展,大洋钻探的地理覆盖面必将扩大,越来越多国家的“专属经济区”将成为钻探的对象,其中许多属于发展中国家。长期以来大洋钻探只是个“富国俱乐部”,如何

联合发展中国家的科学家参加深海研究,扩展参与大洋钻探成员国的范围,将会是摆在我们面前的任务。大洋钻探规划所采用的是几十年的时间尺度,尤其是其硬件建设,必须有足够的前瞻性。比如作为大洋钻探第二代的“地球号”钻探船,是在日本经济鼎盛、石油低价时期开始设计,等到建成运作时这两大优势尽失,于是陷入难以使用的困境,原定打“莫霍钻”的目标一时也难以实现。将来建造世界第三代大洋钻探船,必须在发展新技术、面对新目标的前提下,凝聚国际科技界的共同智慧,在充分国际研讨的基础上着手建造,才能经得起时间的考验。

我国的各门自然科学中,地球科学起步较早。早在晚清的“洋务运动”中,随着发展矿业就带来了地质学。尤其是改革开放 40 年,在政府的大力支持下,我国已经形成了世界上最大的地球科学队伍。但是在整体上,我国地球科学依然没有摆脱发展中国家“原料输出型”的范畴,有待向发达国家的“深加工型”转变,向地球系统科学的方向转型。只有陆上、缺乏海洋,尤其没有深海,是发展中国家地球科学的一大特征。因此发展大洋钻探为旗帜的深海地球科学,是我国地球科学转型的必由之路。现在国际大洋钻探面临着研讨和制定 2023 年后新 10 年科学计划的任务,我国应当尽早从学术上着手准备,争取主办国际科学大会,为制定计划做出实质性贡献。我们多次说过:“由于历史的原因,中国错过了 19 世纪和 20 世纪地球科学的革命,对于进化论和板块学说的建立愧无贡献。现在地球科学向系统科学的方向发展,势将引来 21 世纪的又一场科学革命,而华夏振兴声中的中国正在经历着科学发展的黄金时期,应当面对国际、朝向未来,将大洋钻探国际合作视作自身发展的重大机遇,争取为全人类做出自己的历史贡献”。

推荐阅读文献

- 1 IODR-China Office, State Key Laboratory of Marine Geology. Fifty Years of Ocean Drilling (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2018. 1–396 [中国大洋发现计划办公室, 海洋地质国家重点实验室. 大洋钻探五十年. 上海: 同济大学出版社, 2018. 1–396]
- 2 Jin X C, Zhou Z Y, Wang P X. Ocean Drilling Program and Earth Science in China (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 1995. 1–349 [金性春, 周祖翼, 汪品先. 大洋钻探与中国地球科学. 上海: 同济大学出版社, 1995. 1–349]
- 3 Hsü K J. Thirteen years of deep-sea drilling. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1982, 10: 109–128
- 4 Smith D K, Exon N, Barriga F J A S, et al. Ocean drilling: Forty years of international collaboration. *EOS*, 2010, 91: 393–404
- 5 Wang P X. China's participation in the Ocean Drilling Program: Decade retrospect and future prospect (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2014, 29: 322–326 [汪品先. 我国参加大洋钻探的近十年回顾与展望. *地球科学进展*, 2014, 29: 322–326]
- 6 Jian Z M. Towards the scientific frontier of deep-sea research—Progress of China's participation in ocean drilling (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 3877–3882 [翦知潜. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展. *科学通报*, 2018, 63: 3877–3882]
- 7 Hsü K J. *Ein Schiff Revolutioniert Die Wissenschaft*. Hamburg: Hoffmann & Campe Verlag, 1982 [许靖华. 何起祥, 译. 地学革命风云录. 北京: 地质出版社, 1985]
- 8 Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem Geophys Geosys*, 2008, 9: Q04006
- 9 Peron-Pinvidic G, Manatschal G, Osmundsen P T. Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: A review of observations and concepts. *Mar Pet Geol*, 2013, 43: 21–47
- 10 Sun Z, Jian Z, Stock J M, et al. South China Sea Rifted Margin. In: *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 2018, 367/368, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.367368.2018>

- 11 Dick H J B, MacLeod C J, Blum P, et al. Expedition 360 Preliminary Report: Southwest Indian Ridge lower crust and Moho. International Ocean Discovery Program. 2016, <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.360.2016>
- 12 Hsü K J. The Mediterranean Was a Desert: A Voyage of the Glomar Challenger. New Jersey: Princeton University Press, 1982 [许靖华, 朱文焕, 译. 古海荒漠. 北京: 三联书店, 2003. 215]
- 13 Moran K, Backman J, Brinkhuis H, et al. The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature*, 2006, 441: 6012605
- 14 Wang P X. Ice breaking expeditions: The present and past of the Arctic Ocean (in Chinese). *Chin J Nat*, 2008, 30: 247–251 [汪品先. 破冰之旅: 北冰洋今昔谈. 自然杂志, 2008, 30: 247–251]
- 15 Morgan J, Gulick S, Mellett C L, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program. Chicxulub: Drilling the K-Pg Impact Crater, 2017, 364, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.364.2017>
- 16 Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 2008, 451: 279–283
- 17 Kennett J P, Ingram B L. A 20000-year-record of ocean circulation and climate change from Santa Barbara Basin. *Nature*, 1995, 377: 510–513
- 18 IODP Office. Illustrating Earth's Past, Present, and Future. Science Plan for 2013–2023. Washington DC: IODP, 2011. 1–84 [中国综合大洋钻探办公室, 译. 国际大洋发现计划. 照亮地球过去、现在与未来. IODP 2013–2023 科学计划. 上海: 同济大学出版社, 2011. 1–84]
- 19 Sleep N H, Bird D K, Pope E. Paleontology of Earth's mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 277–300
- 20 Wang P X. Interactions between Earth's deep and surface (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2009, 24: 1331–1338 [汪品先. 地球深部与表层的相互作用. 地球科学进展, 2009, 24: 1331–1338]
- 21 Coffin M F, Duncan R A, Eldholm O, et al. Large igneous provinces and scientific ocean drilling: *Status quo* and a look ahead. *Oceanography*, 2006, 19: 150–160
- 22 Tatsumi Y. The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. *GSA Today*, 2005, 15: 4–10
- 23 Wang P X, Tian J, Huang E Q, et al. Earth System and its Evolution (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018. 1–565 [汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社, 2018. 1–565]
- 24 Wang P, Prell W, Blum P, et al. Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 184. College Station: Ocean Drilling Program, 2000. 1–77
- 25 Liu T S. Significance of ocean drilling and China's paleoceanographic studies. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 2523 [刘东生. 大洋钻探与我国古海洋学研究的国际意义. 科学通报, 2003, 48: 2205]
- 26 Kopf A, Camerlenghi A, Canals M, et al. The Deep Sea and Sub-Seafloor Frontier. Germany: European Commission, 2012. 1–57

Summary for “大洋钻探五十年: 回顾与前瞻”

Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect

Pinxian Wang

State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China
E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

Scientific ocean drilling since 1968 represents the longest-running and most successful international collaboration in Earth science. Over the 50 years, it drilled more than 3700 holes and recovered some 400000 m of cores from the global ocean, offering tremendous new insights into the way our Earth system works and continuing to revolutionize Earth science as a whole. Although China joined this program of international cooperation only in 1998, thirty years after its inception, it becomes one of the most active countries in the recent years largely through the implementation of successive drilling expeditions to the South China Sea.

The present paper is an attempt to briefly review the half-century progress of the international ocean drilling programs and to provide an outlook for its future. As far as the deep-sea remains the science frontiers and drilling provides the unique tool of direct access to the deep sub-seafloor world, the program of international cooperation will continue and develop, yet its structure and performance will change. With the further progress in technology, for example, the long-term sea-floor observation will be incorporated into the program as a major component, and a new generation of drilling platform and tools will be needed. Geographically, ocean drilling program should cover many more new member countries. Driven by its rapidly developing economy, China is going to enhance its input into the international cooperation and to enter the leading core of international ocean drilling as a platform provider.

ocean drilling, deep-sea research, revolution in Earth science, international cooperation

doi: 10.1360/N972018-01162

进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展

翦知湔

同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

E-mail: jian@tongji.edu.cn

1 进入国际深海基础研究前沿

1968 年美国“格罗玛-挑战者”深海钻探船首航墨西哥湾, 开启了划时代的深海钻探计划(DSDP, 1968~1983年). 50 年来, 深海钻探计划历经国际大洋钻探计划(ODP, 1985~2003 年)、综合大洋钻探计划(IODP, 2003~2013年)和当前的国际大洋发现计划(IODP, 2013~2023 年), 成为地球科学领域迄今规模最大、影响最深的国际大科学计划, 导致了地球科学一次又一次的重大突破, 始终站在国际学术前沿.

由于“文革”和科技投入不足的原因, 我国迟至 1998 年才以参与成员身份(年付 50 万美元)加入 ODP, 开启了中国大洋钻探 20 年的发展历程. 2003 年, 我国继续以参与成员身份(会费增加到年付 100 万美元)加入综合大洋钻探计划. 2013 年, 习近平总书记亲自批准, 我国以全额会员身份加入国际大洋发现计划, 并大幅度提高资助强度, 除了每年支付 300 万美元会费, 还以匹配经费的形式资助 IODP 的航次. 在新 IODP 运行的前 5 年(2014~2018 年), 中国为 IODP 提供了 3300 万美元的资助, 成为仅次于美国、日本和欧洲联合体的第四大资助方. 20 年来, 先后有来自教育部、中国科学院、自然资源部等所属的 30 多家单位的 130 余位科学家参加了以南海和菲律宾海为重点的西太平洋以及大西洋、印度洋和南大洋等海域的 60 个大洋钻探航次. 尤其是, 1999 年春成功实施了由我国科学家建议、设计和主持的南海 ODP 第 184 航次, 实现了中国深海钻探“零”的突破. 近 10 年 IODP 的前 5 年内, 我国又实施了 3 个“补助性建议项目(complementary proposal project, CPP)”航次. 在科技部和国家自然科学基金委员会等的大力支持下, 南海大洋钻探研究 20 年长盛不衰, 取得了丰硕的研究成果, 使我国一举进入深海基础研究的国际前沿, 引领我国深海科学发展的方向.

2018 年是中国参加大洋钻探 20 周年, 又适逢国际大洋钻探 50 周年, 特撰此文总结 20 年来中国 IODP 的科学成就, 并展望未来, 以期激励更多青年学者投身大洋钻探的宏伟事业, 为建设海洋强国做出贡献.

2 南海 4 次大洋钻探的主要科学收获

中国参加国际大洋钻探主要收获来自实现以我国为



翦知湔 同济大学海洋与地球科学学院院长、教授, 现任国际过去全球变化计划 PAGES 执委、中国 IODP 专家咨询委员会副主任. 主要从事海洋地质学的教学与科研.

主的 4 个 ODP-IODP 航次: 1999 年以“东亚古季风”为主题的 ODP 第 184 航次, 由汪品先和 Warren Prell 为首席科学家; 2014 年以“南海海底扩张”为主题的 IODP 第 349 航次, 由李春峰和林间为首席科学家; 2017 年以“南海裂谷破裂”为主题的 IODP 第 367 和 368 航次, 分别由孙珍和 Joann Stock, 以及翦知湔和 Hans Christian Larsen 担任首席科学家. 如果算上 2018 年 11 月 15 日~12 月 8 日正在实施的 IODP 第 368X 航次(主题是“重返南海北部 U1503 站”), 近 20 年来在我国科学家设计和主持下实现了“4+1”次南海大洋钻探, 钻探深海 18 个站位, 其中 12 处水深超过 3000 m, 取回岩芯近万米, 其中 7 处钻进了岩浆岩基底(图 1). 南海的大洋钻探使我国科学界提出了自己的新认识, 在气候演变和海盆形成方面向套用大西洋模式的流行观点提出挑战, 使南海成为全球深海研究程度最高的边缘海, 并且确立了我国在南海深海科学研究中的国际主导权.

2.1 气候演变热带驱动: 大洋碳储库的偏心率长周期

南海大洋钻探建立了西太平洋区最佳深海沉积剖面. 1999 年在南海实施的大洋钻探 ODP 第 184 航次取得了西太平洋三千多年以来的沉积记录, 其中 ODP 1143 和 1146 站近 5 Ma 以来的有孔虫碳同位素变化显示了非常规律的 40~50 万年周期性^[1,2]. 将南海 5 Ma 以来有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 与各大洋以及地中海的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对比, 发现在上新世 $\delta^{13}\text{C}$ 最大值严格对应于偏心率的最小值, 呈现出稳定的 40 万年长周期, 然而自 1.6 Ma 开始, 大洋 $\delta^{13}\text{C}$ 最大值与偏心率最小值的对应关系发生错位, 大洋 $\delta^{13}\text{C}$ 展示了 50 万年长

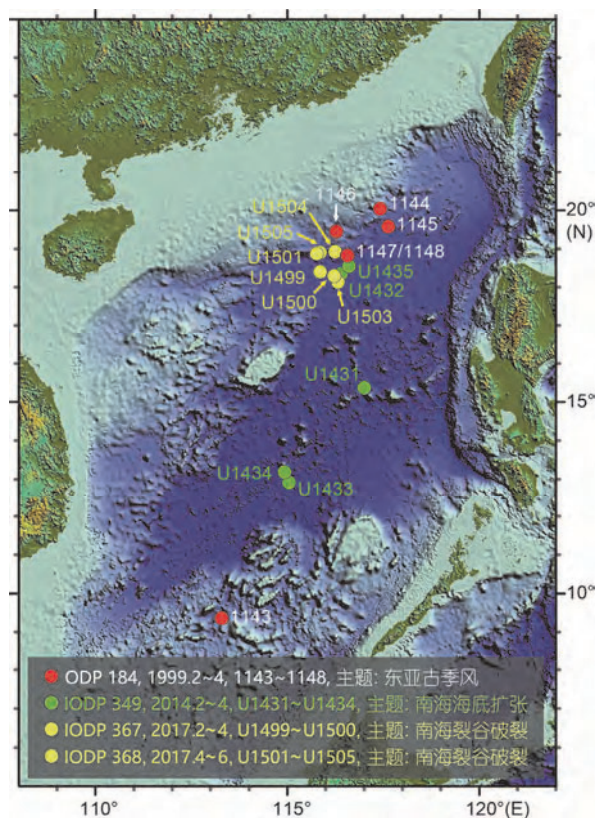


图 1 南海 4 次大洋钻探的科学主题和站位

Figure 1 Scientific themes and sites of the four ocean drilling expeditions in the South China Sea

周期^[3](图 2)。碳循环的偏心率长周期变化更具有穿时性,普遍存在于新生代甚至中生代的海洋和气候记录中,尤其是在中中新世^[4]和渐新世^[5],因此被喻为地球气候系统的“心跳”节律。为此,我国学者提出大洋碳储库 40 万年长偏心率周期的“溶解有机碳假说”,认为大洋营养盐的供应通过“生物泵”和“微生物泵”的消长,控制着溶解有机碳和颗粒有机碳的比例,进而造成海水 $\delta^{13}\text{C}$ 的长周期变化;但是冰盖迅速增长导致大洋碳储库改组,就可能破坏周期变化的韵律^[3]。然而,从偏心率到海水营养盐供应变化之间,仍然缺一个环节,这就是全球季风所体现的水文循环。水循环变化在海洋地质记录中的体现是化学风化强度引起的元素丰度变化。南海近 5 Ma 来的记录,展示了季风降水造成风化作用的 40 万年轨道周期,而这正是大洋碳循环长周期的驱动力^[6]。

国际流行的气候演变理论,主要强调高纬区,尤其是北大西洋北部海区的控制,而忽视低纬海区。南海大洋钻探的研究提出了气候演变的冰盖驱动和热带驱动的“双重驱动”假说^[7],并将气候演变热带驱动落实在“全球季风”演变的新概念上,提出了全球季风为标志的水循环假说,和以微生物碳泵为基础的溶解有机碳假说,使得低纬全球季风演

变与冰盖消长一样,已成为国际过去全球变化(PAGES)的新命题。这是对气候演变的米兰科维奇理论的一种新认识,有助于对地球环境长期变化趋势的科学预测。

2.2 西太平洋地质演变: 南海构造成因的新认识

中国的地球动力学与宏观演变,历来重视西边(印度碰撞),忽视东边因素(太平洋板块),因而突破点也在太平洋方向。尤其是,地球上 75% 的边缘海分布于西太平洋,其形成过程必然改变全球的宏观地质格局。其中,南海由于其纬度低以及处于太平洋和特提斯海之间的地理位置,而且上接青藏高原,具有沉积速率高、地层保存好的优越条件,是开展西太平洋边缘海形成过程研究的理想海域。自 20 世纪以来,在西太平洋与构造有关的大洋钻探航次多达 20 余个,广泛分布在菲律宾海、日本海和南海等海域。但是,日本海大洋钻探的 3.5 个航次中有 3 个是 20 世纪 80 年代以前的,且只有 3 处钻入基底。相比之下,南海是西太平洋大洋钻探材料最丰富的边缘海,近 20 年已经执行 4 次大洋钻探,从海底扩张上溯到裂谷过程,从海盆的残留中脊追踪到洋陆过渡带,为回答岩石圈由陆变海的地质学基本问题提供了宝贵岩芯材料。

过去对南海深部扩张历史的研究主要依赖于地球物理资料提供的间接证据^[8],为了获得深海盆岩石学的直接证据,大洋钻探是唯一办法。2014 年南海 IODP 第 349 航次成功在东部和西南次海盆获得了南海基底的新鲜洋壳玄武岩样品,通过同位素定年、地球化学分析等综合研究,确定了南海深海盆于 15~16 Ma 停止扩张的年龄,其中东部次海盆在 15 Ma 停止,而西南次海盆在 16 Ma 停止^[9],澄清了有关南海海盆扩张历史的争论。2017 年 IODP 第 367 和 368 航次首次建立起南海新生代甚至晚中生代以来完整的地层序列,揭示南海最早海侵发生在距今 40 Ma,南海大陆边缘在晚始新世的同张裂期已处于深水环境,发生复杂的沉积和深海火山活动,稍后期的岩浆活动已具有典型洋中脊玄武岩特征^[10](图 3)。这说明南海在裂谷期就有强烈的岩浆作用,明显不同于北大西洋伊比利亚-纽芬兰的世界典型^[11],揭示了南海不同于大洋模式的边缘海张裂机制。

40 年来关于南海成因的观点来自欧洲:法国人提出印度的碰撞使印支半岛向南突出,推出了南海,所以原因在北边^[12];英国人认为古南海向婆罗洲的俯冲,拉开了南海,原因在南边^[13]。大洋钻探的结果揭示了南海深海盆由东向西推进的记录。特别是,从菲律宾海到南海中央海盆、西南次海盆,海底扩张从东向西扩展,说明很可能南海的张裂来自西菲律宾海方向。因此,通过钻探,否定了南海地震剖面按照大西洋模式的解释,南海裂谷作用和海底扩张具有西太平洋边缘海的特色,南海应当为边缘海提供形成演化的地质模型。

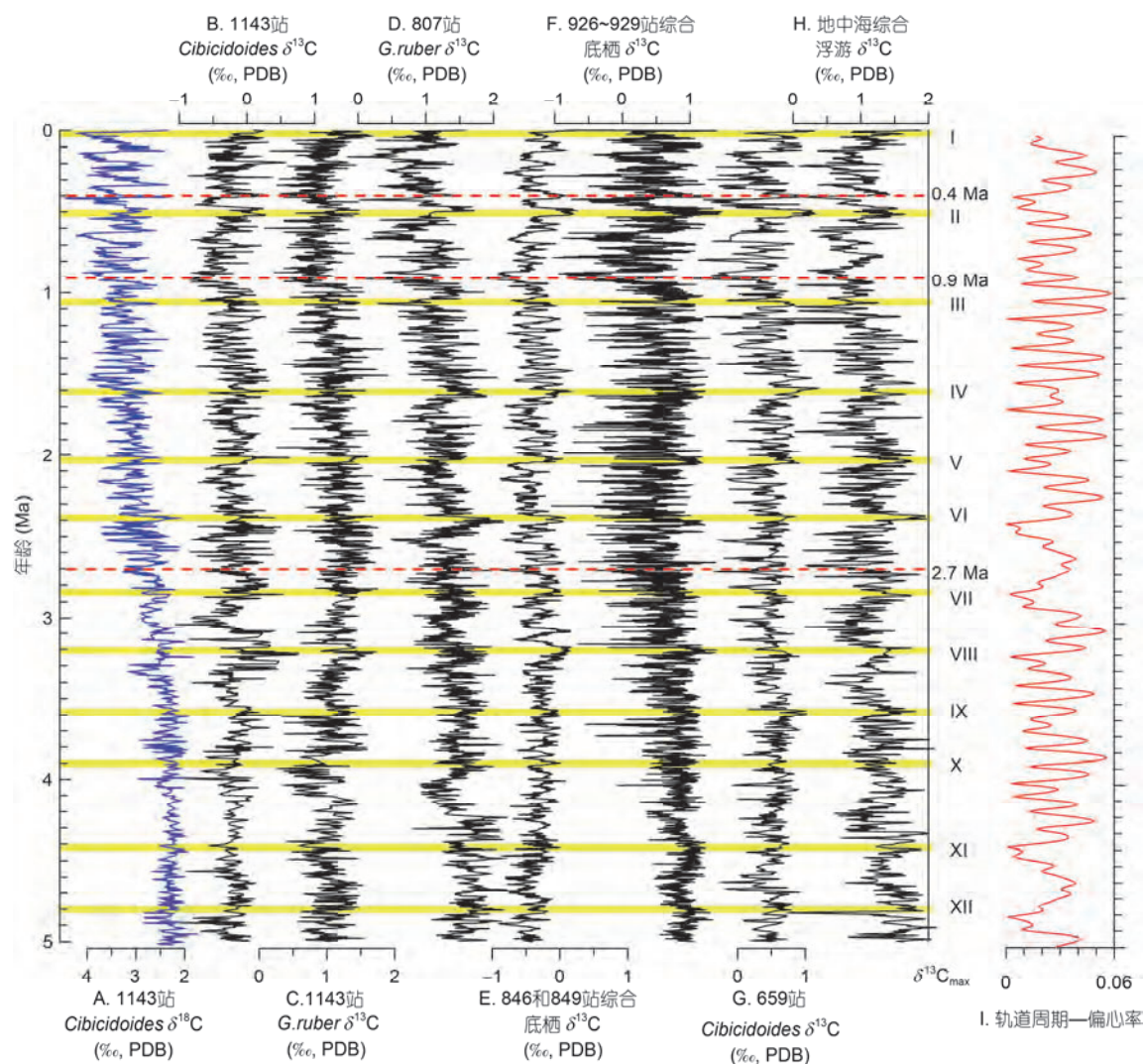


图2 南海和全球过去5 Ma的海洋碳同位素记录^[3]。A~C, ODP 1143站, 南海: A, 底栖 $\delta^{18}\text{O}$; B, 底栖 $\delta^{13}\text{C}$; C, $\delta^{13}\text{C}$ 。D和E, 太平洋: D, ODP 807站的浮游 $\delta^{13}\text{C}$; E, ODP 846和849站的综合底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 。F和G, 大西洋: F, ODP第154航次(926~929站)的综合底栖 $\delta^{13}\text{C}$; G, ODP 659站的底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 。H, 地中海: 综合浮游 $\delta^{13}\text{C}$ 。黄色条表示 $\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$; 红色虚线表示在2.7、0.9和0.4 Ma的冰盖主要发育事件

Figure 2 Carbon isotopic records from the South China Sea and global ocean over the past 5 Ma^[3]. A~C, ODP Site 1143, South China Sea: A, benthic $\delta^{18}\text{O}$; B, benthic $\delta^{13}\text{C}$; C, $\delta^{13}\text{C}$. D~E, Pacific: D, planktonic $\delta^{13}\text{C}$ of ODP Site 807; E, stacked benthic $\delta^{13}\text{C}$ of ODP Sites 846 and 849. F~G, Atlantic: F, stacked benthic $\delta^{13}\text{C}$ of ODP Leg 154 (sites 926~929); G, benthic $\delta^{13}\text{C}$ of ODP Site 659. H, Mediterranean: Stacked planktonic $\delta^{13}\text{C}$. Yellow bars indicate $\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$; red dotted lines denote major events of ice-sheet development at 2.7, 0.9 and 0.4 Ma

3 促进我国地球系统研究的新局面

中国参与大洋钻探不仅为我国科学家参加三大洋和南北极的深海探索创造了条件, 而且使我国学术界进入深海研究的国际前沿, 与国际深海科学的各主要领域全面接轨。譬如, IODP第349航次在南海发现世界首例由碳酸盐质母岩浆向碱性玄武岩连续转化的现象^[14], 打开了揭秘深部碳循环的一扇新的窗户, 将大大推动有关深部碳对岩浆活动、地表环境的影响等相关研究。又如, 南海大洋钻探在南海水深3500 m以下站位的声学基底(玄武岩、蚀变玄

武岩或者砾岩)之上, 发现有渐新世至中新世的红褐色黏土沉积^[15], 与广布于苏禄海、苏拉威西海、菲律宾海在内的西太平洋洋壳玄武岩之上的红褐色黏土一致, 为重新认识大洋红层发育机理提供了新的证据。因此, 南海大洋钻探取自深海盆的岩芯, 首次为大洋岩石学和深海沉积学提供了宝贵材料, 使我国的深海研究从古海洋学拓展到大洋岩石圈的地球化学和地球物理研究等新领域, 我国的沉积学从陆地和近岸进入深海, 从而覆盖了深海地球科学的各主要领域, 扭转了长期以来海陆脱节、重陆轻海的偏向, 将我国陆地和太平洋地质连接起来, 促进了海陆结合的地

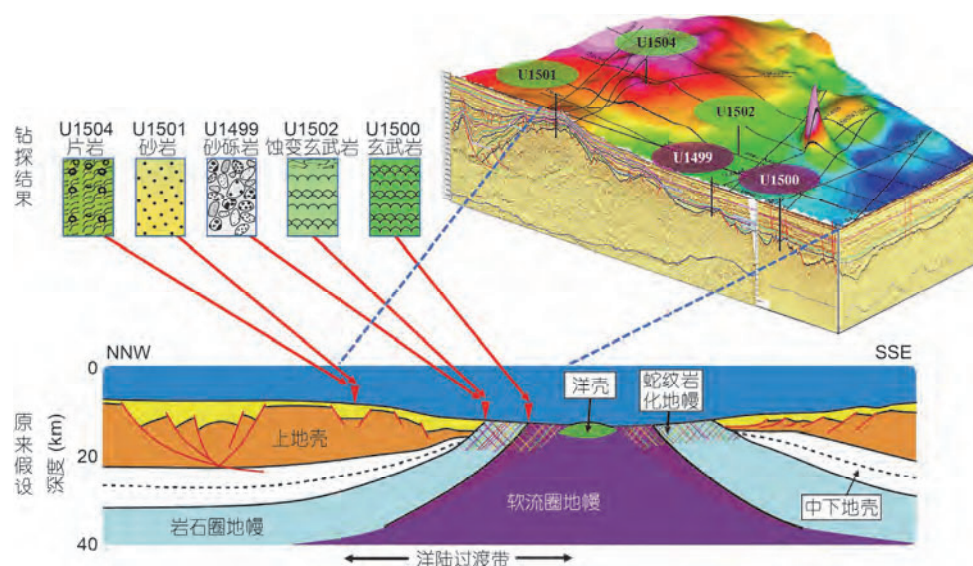


图3 南海 IODP 第 367~368 航次钻探结果否定了原来假设, 5 个站位的基底完全不同^[10,11]

Figure 3 The results of the IODP Expeditions 367~368 in the South China Sea have denied the original hypothesis, and the basements of the five sites are completely different^[10,11]

球系统研究新局面, 推进了我国地球科学整体的发展。

此外, 南海大洋钻探推进我国对南海深水油气勘探的理论认识, 为南海的油气勘探研究提供了对比的据点。深海油气勘探的地质判断, 大量依靠地震剖面等地球物理的间接证据, 而大洋钻探取得的岩芯, 为地震剖面的地质解释提供了直接的地层检验, 确立了区域地层的标准剖面。譬如, ODP 第 184 航次的 1148 站多年来已成为南海深水油气勘探的重要参数井。实际上, 油气勘探的地质研究着重在陆架和陆坡上部, 大洋钻探从深海盆取得的地质记录, 为南海资源勘探提供了不可替代的深部信息, 深化了对南海沉积盆地成因的认识, 揭示了油气和天然气水合物等的形成条件和变化规律。因此, 大洋钻探从基础研究角度为资源开发提供了无可替代的宝贵资料和认识。

4 中国大洋钻探的科学突破前景

随着陆地的资源枯竭和环境恶化, 深海海底和地球内部的重要性更加突出; 随着“全球变化”的深入, 地球表层和地球内部的相互交换也越来越成为地球和生命科学探索的前沿。可见, 国际学术界探索海底深部的势头方兴未艾, 地球表层和内部的连接也必将成为地球科学的下一个突破口。深海海底是地球表面最接近地球内部的地方, 到深海海底打钻是直接探索地球内部无可替代的手段。然而, 大洋钻探 50 年后, 世界大洋仍旧留下大片空白; 已经钻探的站位, 也往往只打到“头皮”, 许多古海洋学的目标, 因为沉积太厚、或可能有油气威胁, 未能实现。因此国际大洋钻探的科学前景不容质疑。

现在, 建设海洋强国已经成为我们的国策, 继续增强

在国际大洋钻探中的参与力度、逐步争取进入领导层, 已是我们不容争议的目标。2014 年中国 IODP 专家咨询委员会为我国拟订了“三步走”战略目标: 第一步实现 2~3 个我国为主的 CPP 航次; 第二步仿效欧洲, 争取成为 IODP 又一个“平台提供者”; 第三步: 建造世界第三代的大洋钻探船。2017 年 6 月 IODP 第 368 航次结束, “决心号”在上海举行靠港活动, 4 年里完成南海 3 个航次, 标志着第一步目标已经完成。当前的任务就是第二步, 内容包括自主组织实施“特定任务钻探平台(MSP)”航次, 建设全球第 4 个大洋钻探岩芯实验室, 以及主办新 10 年科学计划的国际研讨等。具体说, 准备选择南海南部的巽他陆架, 通过国际合作, 由我国出船执行大洋钻探航次, 研究几百万年来的海平面升降和热带雨林出没对陆地碳储库的影响^[16], 继续扩大我国在南海大洋钻探和基础研究上的主导权。

更重要的是, 进入 IODP 领导权不能只靠经费投入, 更要靠科技水平, 为此我国应该发起制定 2023 年后的国际大洋钻探新的科学计划。气候演变热带驱动和西太平洋地质演变的研究是我国在大洋钻探领域最具有国际竞争力的方面。将南海深海记录与现代深海过程的研究结合起来, 将揭示全球季风与气候演变热带驱动在全球气候变迁中的作用, 促进我国地球科学的古今结合、向跨圈层跨学科的方向发展。然而, 气候的热带驱动是一个有争议的、还没有成为学术界主流意识的命题。经过近 10 年的探索, 已经初步认识到“热带驱动”可能的突破点, 关键在于如何在地球表层穿越大气、海洋、生物和岩石圈探索不同时间尺度(构造尺度、轨道尺度、海洋尺度)上的水循环和碳循环及其相互关系。同时, 从全球的地幔循环着眼, 利用我

国的海洋与陆地结合的优势,将东亚-西太平洋表层过程与深部过程结合起来进行研究,阐明晚中生代东亚-西太平洋的构造特色,确定晚新生代西太平洋的转折事件,揭示西太平洋区的地球动力学格局,将有助于对当今的全球板块系统研究,为我国环境变化和资源前景的宏观评价提

供科学基础。

大洋钻探相当于国际深海科学的奥运会,其领导权的争夺反映了深海领域的国际地位之争。为此,我国迫切需要通过几年的努力,力争进入大洋钻探的国际领导核心,为建设“海洋强国”做出关键性的贡献。

推荐阅读文献

- 1 Wang P X, Tian J, Cheng X R, et al. Carbone reservoir changes preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event. *Geology*, 2003, 31: 239–242
- 2 Clemens S C, Prell W L, Sun Y, et al. Southern Hemisphere forcing of Pliocene $\delta^{18}\text{O}$ and the evolution of Indo-Asian monsoons. *Paleoceanography*, 2008, 23, doi: 10.1029/2008PA001638
- 3 Wang P X, Li Q Y, Tian J, et al. Long-term cycles in the carbon reservoir of the Quaternary ocean: A perspective from the South China Sea. *Natl Sci Rev*, 2014, 1: 119–143
- 4 Holbourn A, Kuhnt W, Schulz M, et al. Impacts of orbital forcing and atmospheric carbon dioxide on Miocene ice-sheet expansion. *Nature*, 2005, 438: 483–487
- 5 Pälike H, Norris R D, Herrle J O, et al. The heartbeat of the Oligocene climate system. *Science*, 2006, 314: 1894–1898
- 6 Tian J, Xie X, Ma W, et al. X-ray fluorescence core scanning records of chemical weathering and monsoon evolution over the past 5 Myr in the southern South China Sea. *Paleoceanography*, 2011, 26: 1–17
- 7 Wang P X, Tian J, Lourens L J, et al. Obscuring of long eccentricity cyclicity in Pleistocene oceanic carbon isotope records. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 290: 319–330
- 8 Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basin. In: Hayes D E, ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*. Am Geophys Union Geophys Monogr, 1980, 23: 89–104
- 9 Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349. *Geochem Geophys Geosys*, 2015, 15: 4958–4983
- 10 Sun Z, Jian Z M, Stock J M, et al. South China Sea rifted margin. In: *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 2018. <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.367368.2018>
- 11 Larsen H C, Mohn G, Nirrengarten M, et al. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea. *Nat Geosci*, 2018, 11: 782–789
- 12 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10: 611–616
- 13 Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *J Asian Earth Sci*, 2002, 20: 353–431
- 14 Zhang G L, Chen L H, Jackson M G, et al. Evolution of carbonated melt to alkali basalt in the South China Sea. *Nat Geosci*, 2017, 10: 229–235
- 15 Jian Z M, Larsen H C, Alvarez Zarikian C A, et al. Expedition 368 Preliminary Report: South China Sea Rifted Margin. College Station: International Ocean Discovery Program, 2018. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.368.2018>
- 16 Jian Z M, Dang H W. Reading the past, informing the future: Progress and prospective of the recent ocean drilling researches on climate and ocean change (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2017, 32: 1267–1276 [翦知潜, 党皓文. 解读过去、预告未来: IODP 气候与海洋变化钻探研究进展与展望. *地球科学进展*, 2018, 32: 1267–1276]

Summary for “进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展”

Towards the scientific frontier of deep-sea research—Progress of China’s participation in ocean drilling

Zhimin Jian

State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China
E-mail: jian@tongji.edu.cn

The International Ocean Discovery Program (IODP, 2013–2023) and its predecessors the Deep Sea Drilling Program (DSDP, 1968–1953), the Ocean Drilling Program (ODP, 1985–2003), and the Integrated Ocean Drilling Program (IODP, 2003–2013) are the largest and most influential international scientific program in the field of geoscience. China joined the ODP in 1998, and four ocean drilling expeditions have been carried out so far in the South China Sea (SCS): ODP Leg 184 in 1999 with the theme of “East Asian monsoon evolution”, IODP Expedition 349 in 2014 with the theme of “South China Sea seafloor spreading”, and IODP Expeditions 367–368 in 2017 with the theme of “South China Sea rifted margin”. There are 18 deep-sea drilling sites in the four expeditions to the SCS, 12 of which have water depths of more than 3000 m and 7 of which have penetrated the igneous basement, and nearly 10000 m of sediment and rock have been recovered in total. The results of ocean drilling in the SCS have put forward our own understandings on climate evolution and basin formation. (1) According to the discovery of long eccentricity cycle of ocean carbon reservoir, a double driving hypothesis of climate evolution by ice sheet and tropical processes had been proposed, making the evolution of low-latitude global monsoon, like the growth and decline of polar ice sheet, to become a new proposition of the International Past Global Change Study (PAGES). (2) The newly completed IDOP expeditions 367 and 368 in the SCS have recovered the complete record of the SCS evolution from land to deep-sea, particularly including the discovery of the marine Eocene in the northern SCS, displaying that the seafloor spreading of the SCS propagated from east to west and probably originated from the western Philippine Sea to the east. These findings challenged the traditional view of the North Atlantic. The SCS is not a mini Atlantic and promising to provide a geological model for the formation and evolution of the marginal sea. These new discoveries and new knowledge make the SCS to be the most intensively studied marginal sea in the world, and establish China’s dominance in the international deep-sea scientific researches of the SCS. At the same time, the ocean drilling in the SCS has greatly promoted the Chinese academic circle to integrate with the main fields of international deep-sea science, and enter a new phase of the land-sea combined earth system study. From the perspective of basic research, it provides irreplaceable valuable information and knowledge for oil and gas exploration, particularly in deep waters in the SCS. In addition, China’s participation in ocean drilling has also provided much needed opportunities for Chinese scientists to participate in the deep-sea exploration of the oceans including the Antarctic and Arctic oceans, and formed a high-level deep-sea scientific and technological research team, leading our deep-sea scientific research to the international frontiers. At present, China is in the critical period of building a powerful maritime country, and is striving to be a member of the international leadership in ocean drilling.

ocean drilling, South China Sea, climate evolution, basin formation, marginal sea, deep-sea research

doi: 10.1360/N972018-01159

PROMOTING INTERNATIONAL SCIENTIFIC OCEAN DRILLING

