

南海及邻域基础地质问题与中国大洋钻探选址

尉建功^{1,2)}, 李海兵^{2,3)}, 翦知湑⁴⁾, 李春峰^{5,6)}, 孙珍⁷⁾

- 1) 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所, 海南三亚, 572025;
- 2) 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州, 511458;
- 3) 中国地质科学院地质研究所, 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京, 100037;
- 4) 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海, 200092;
- 5) 浙江大学海洋科学系, 浙江舟山, 316021;
- 6) 海南浙江大学研究院, 海南三亚, 572025;
- 7) 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室, 广州广东, 510301

大洋科学钻探是研究海洋地质、探索地球系统的一盏明灯。国际大洋钻探计划自1968年发起至今已实施50余年, 历经“深海钻探计划(DSDP)”、“大洋钻探计划(ODP)”、“综合大洋钻探计划(IODP)”和“国际大洋发现计划(IODP)”四个阶段, 已经成为地球科学领域迄今规模最大、影响最深、历时最久的国际大科学计划。国际大洋钻探计划的实施改变了我们对地球系统的认识, 包括对海底扩张的首次确认、南极和北半球冰川史以及海底极端环境生物圈的发现等。因此, 继续推动国际大洋钻探计划将有利于解开地球系统的众多未解之谜。

南海是西太平洋地区规模最大且具有代表性的边缘海。中国自1998年加入大洋钻探计划(ODP)以来, 在南海组织实施了“4+1”个航次, 共钻探17个站位, 其中11个站位水深超过3000 m, 获取岩芯近万米。实施航次包括ODP184、IODP349和IODP367/368/368X, 取得了一系列创新进展与重大突破, 将中国南海地质研究推向国际前沿。1999年, ODP184航次在南海南北陆缘获取了南海晚新生以来的代沉积记录, 揭示了南海30 Ma以来的气候环境演变, 发现了大洋碳储库的长周期。2014年, IODP349航次首次获得深海盆完整沉积记录和大洋玄武岩岩芯, 精确测定了南海东部次海盆和西南次海盆海底扩张结束的年龄, 解决了40多年来有关南海海盆扩张历史的争论。2017年和2018年, IODP367/368/368X航次首次实现了对南海张裂-破裂-扩张发育历史的钻探和取样, 对南海盆地演化史的研究起到了重要约束作用, 证实南海陆缘不同于伊比利亚型陆缘, 具有陆洋转换迅速的特点, 提升了对陆洋转换过程和机制的认识。

南海深部计划和国际大洋钻探计划, 不仅为探索南海积累了丰富的基础资料, 同时也提出了一系列新的科学问题。目前, 我国的海洋地球科学正在进入崭新的发展阶段, 通过20多年持续参与国际大洋钻探计划, 已经形成一支具有一定规模、较高水平和国际视野的深海科学研究队伍, 围绕大洋钻探南海选址, 聚焦新的科学问题和科学目标, 将有助于进一步提升我国在国际大洋钻探计划中的影响, 际深海科学研究作出贡献。

应《地质学报》主编杨经绥院士邀请, 为庆祝《地质学报》创刊100周年, 我们组织了《中国大洋钻探南海钻探选址》专辑。本专辑围绕IODP《2050科学框架: 科学大洋钻探探索地球》的研究主题, 聚焦未来南海钻探科学问题, 组织了23篇相关内容的学术论文, 主要为综述和研究论文, 包括以下六个主题: (1)南海及周缘岩石圈结构、分布与演化; (2)海底扩张动力学; (3)盆地沉积与构造演化; (4)活动构造及其资源环境效应; (5)油气及水合物的成藏勘探与开发; (6)数值模拟研究等。以下将对这六方面成果做一简要综述。

(1)南海及周缘岩石圈结构、分布与演化

莫霍面是地球内部壳幔边界, 是地球内部最接近地球表面的全球性分界面, 与人类的生存环境关系十分密切。莫霍面究竟是地壳和地幔之间的相变界面还是化学界面, 这是地球科学界长期关注的重大科学问题。因此, 通过钻井钻穿莫霍面(莫霍计划)揭开地壳下面地幔的秘密, 实现地学研究的重大突破是人类一直以来的梦想。“莫霍计划”开启了大洋钻探的新篇章, 拉开了探索大洋岩石圈的序幕。目前研究推测南海是世界

上莫霍面深度最浅的海域之一。秦绪文等(2022)基于长达 15000 km 的深反射多道地震剖面的解释和分析,结合前人的研究,取得了南海海盆区莫霍面反射特征和空间分布的认识,提出南海东部次海盆南部莫霍面反射最为强烈且清晰,深度较浅,具备莫霍面钻探的基本条件。张伙带等(2022)提出南海东部次海盆古扩张脊附近的管事平顶海山出露的大洋斜长花岗岩可能为洋壳深部物质剥露海底,是南海的一个重要构造窗口,有望成为南海深部地壳和莫霍面钻探的潜在优选区。吴婵等(2022)通过分析国际上莫霍计划的选址和策略,结合我国南海洋壳的特征,初步提出“南海莫霍计划”的两个站位及策略。李志康等(2022)利用 Parker-Oldenburg 法计算得到地壳密度分布,并结合基于小波变换的导纳法计算得到南海岩石圈有效弹性厚度在 0~16 km 范围内。

南海盆地及周缘地区新生代玄武岩对揭示南海盆地的演化历史至关重要,然而这些玄武岩的成因还存在争议。海南岛玄武岩是揭示南海深部岩浆和地幔作用的最佳窗口。曹楚奇等(2022)提出海南岛临高县多文组玄武岩的形成与海南地幔柱活动有关,并认为南海地幔柱是南海盆地的伸展的被动响应。牛晓露等(2022)根据海南岛北部岩性跨度大的晚新生代玄武岩,探索了其成分随时间演化的规律并对其成因进行了探讨。冯光英等(2022)根据海南岛北部的全新世早期石山组橄榄玄武岩的主微量元素及同位素研究,探讨了其岩浆来源及其动力学机制。

(2)海底扩张动力学

南海是我国唯一发育洋壳且保留海底扩张信息的边缘海,正确认识南海西南次海盆扩张运动学特征是研究南海新生代扩张与构造演化的关键。邱燕等(2022)利用反射地震剖面、重力异常和磁异常资料、IODP 大洋钻孔资料等,详细分析了西南次海盆的地质构造特征,提出海盆的扩张自北东至西南同时开启,扩张速率却自北东至西南逐渐减慢,导致越往西洋壳区越窄,使得海盆西部尖角区域成为有拉张而无扩张、面积较窄的过渡壳区,因而形成呈“V”字型展布的西南次海盆,呈“剪刀式扩张”。

(3)盆地沉积与构造演化

南海位于欧亚大陆、印度-澳大利亚板块以及太平洋板块的交汇处。由于受到三大板块的联合作用,地应力状态复杂,形成了不同类型、构造演化各异的沉积盆地。盆地沉积过程不仅记录南海构造演化历史,而且记录有环境变化信息。刘栋梁等(2022)通过总结前人在南海北部主要盆地新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄研究成果,探讨珠江、红河和昆莺琼古河的新生代演化历史以及与南海盆地形成关系。刘仲强等(2022)对南海北部珠江口盆地珠一坳陷东西两侧典型地区的样品锆石进行了物源示踪、沉积源汇分析,探讨其物源变化的构造成因,从沉积学角度为论证南海大陆架科学钻探选址提供依据。杜文波等(2022)利用珠江口盆地恩平凹陷的三维地震资料和钻井数据,通过古生物环境分析和锆石 U-Pb 定年等方法,对恩平凹陷恩平组物源体系特征进行综合分析,并提出下一步大洋钻探的设想。

在大陆边缘海域中冷泉系统广泛发育,我国的南海北部海域因其独特的地质条件成为了研究冷泉系统的天然实验室。尉建功等(2022)对近年来南海北部冷泉碳酸盐岩的相关研究成果进行了综述,认为琼东南海域和东沙海域冷泉区是对地质历史时期冷泉活动进行深入研究理想区域,并提出为重建地质历史时期以来的冷泉活动,探讨其对全球变暖和碳循环的影响,未来需要在该区域进行大洋钻探。南海发育大量新生代碳酸盐台地,它们是南海古构造、古气候和古海洋演变的重要信息来源,也是石油天然气的重要储层,因此,亟需开展南海碳酸盐台地大洋钻探(吴时国等,2022)。中建南盆地是位于南海西部陆缘,具有南海北部张裂和西部走滑的双重构造特征,盆地发育新生界多个区域不整合面,对于研究盆地的沉积-构造演化史、油气资源以及南海的形成过程都具有重要意义。王伟平等(2022)通过中建南盆地钻井资料,对深反射地震剖面进行了重新解译,标定海底扩张结束后(中中新世以来)两个区域不整合面的地质属性,并开展了区域构造运动分析,提出未来大洋钻探的意义。

(4)活动构造及其资源环境效应

新生代以来青藏高原的隆升和物质向东南的挤出逃逸对南海的构造演化产生了重要的影响。哀牢山-红河断裂带及其向东南的延伸作为二者之间的纽带,直接控制了南海西北部陆缘岩石圈裂解及盆地的构造迁移和演化过程。Chevalier Marie-Luce 等(2022)讨论了红河断裂系及其周缘的第三纪和现今变形特征基础上,重点论述了其在上新世-第四纪从云南东南部到越南北部、北部湾西部、再到更南的沙巴地区的断裂分

布和运动学特征,以及在菲律宾、台湾和巽他之间南海大部分地区大规模构造反转的运动学效应。

滨海断裂带是南海北缘的一条大型活动断裂带,位于靠近我国华南沿海地区,其西段和东段历史上至少曾发生过 4 次 $M7$ 级以上大地震,该断裂带再次发生大地震并触发海啸必将对我国华南沿海地区造成灾难性破坏。因此,开展滨海断裂带变形机制和地震危险性认识对我国海洋防灾减灾具有重要意义。杨晓东等(2022)建议在滨海断裂带的西段、中段和东段进行大洋钻探,重建滨海断裂带东段和西段的大地震历史和复发周期,揭示断裂中段大地震空区的成因,解析断层分段式破裂的原因。朱荣伟等(2022)基于地震资料认为琼东南断裂带属于滨海断裂带在南海西北部的延伸,并提出选择阳江外海域滨海断裂带和琼东南断裂带为钻探靶区,并以钻取断裂两盘和断裂带岩芯为目的,开展滨海断裂带地震危险性评价认识。

(5) 油气及水合物的成藏勘探与开发

南海作为西太平洋最大的边缘海,资源丰富,是海洋油气和天然气水合物重要的储存区。南海的油气和天然气水合物勘探与开发已成为国家战略走向深海的重要内容之一。天然气水合物是极具潜力的能源资源,具有重要的战略价值,加强对天然气水合物的勘探已成为各国共识。然而,外部环境的变化容易导致水合物的分解,从而发生海底甲烷渗漏,对于天然气水合物勘探是一项挑战。苗晓明等(2022)总结了近年来南海沉积物甲烷渗漏事件研究取得的基本认识,并提出了未来具有潜力的研究手段和可能的发展方向,同时建议将南海琼东南盆地海马冷泉区作为我国大洋钻探船未来在南海的钻探目标区。钟广见等(2022)根据钻探资料,分析提出南海东北部潮汕盆地是中生代残留拗陷,泥岩地层厚,烃源岩有机质丰度相对较高,生烃能力强,油气地质条件好,具有较好的油气勘探前景。

泥火山是地下泥质流体喷发到地表或海底所形成的丘状构造,其形成与油气成藏、天然气水合物成矿有着直接联系,其喷发活动易引发勘探工程事故,喷发的大量甲烷气体会加剧温室效应。万志峰等(2022)建议选取南海北部台西南盆地典型泥火山开展钻探,获取海底泥火山发育的构造环境、沉积背景、温压场等参数,揭示泥火山成因机制,建立海底泥火山油气渗漏模式,探讨泥火山流体传热过程对水合物形成与分布的影响,对油气勘探与开发具有重要指导意义。

(6) 数值模拟研究

数值模拟已成为目前构造动力学研究不可或缺的重要内容,其正演和反演是认识南海形成演化的重要手段。欧亚-菲律宾板块的会聚,造成了南海东部次海盆被动俯冲于菲律宾板块之下。为了验证被动俯冲和主动俯冲对俯冲角度的控制作用,杨少华等(2022)构建了二维高精度数值对比模型,考察会聚方向的差异对俯冲角度的影响,其模拟结果显示,仅仅改变会聚方向,俯冲角度就能够发生巨大变化,在被动俯冲背景下如果条件合适则易于发生低角度俯冲,提出台湾-吕宋双火山弧一种新的可能演化机制。张慧慧等(2022)利用基于有限元的数值模拟手段,对扩张期不同背景(洋中脊、拆离断层)、不同扩张速率的热液循环与洋壳增生的关系进行研究,推测海盆内异常薄洋壳和不同扩张时期的最薄洋壳厚度差异受到扩张期热液循环阶段性减薄洋壳作用的影响。

注入南海的古金沙江的袭夺及其相关的长江第一弯的形成不仅造成了南海一系列盆地内部充填物质的急剧变化,同时还记录了与南海北部边缘海扩张相关的构造活动机制的重大变革。郑勇等(2022)通过 TTLEM 和 LIFFE 模型直接对虎跳峡的贯通和下切过程开展数值模拟分析,结果显示初始的贯通应形成于中新世中期~15 Ma 前后,~2 Ma 以来形成了现今的地貌样式。认为伴随着印度板块向欧亚板块之下持续的俯冲,青藏高原东南缘南东向的物质运移曾发生过一系列构造活动机制的重大转变,不仅引起了区域内断裂系统活动性质的转换,造成了大型水系的袭夺和重组,同时还与南海海盆的扩张和最终形成紧密关联。

上述研究中不仅涉及到南海区域沉积-构造演化和深部岩石圈演化,而且提出有关南海钻探潜在的选址区,如南海东部次海盆南部、南海管事平顶海山、南海北部冷泉碳酸盐岩区、北部西沙海域碳酸盐台地、北部台西南盆地泥火山区、琼东南盆地海马冷泉区、北部陆缘珠江口盆地、南海东部次海盆南部、中建南盆地、琼东南断裂带、滨海断裂带等聚焦不同的科学问题,与当前国际大洋钻探的主要研究问题相比,本专辑覆盖研究内容和研究方向还不够全面。目前发表的相关新的研究成果和认识以及有关钻探选址建议,供读者参考、讨论和探索。我们期待这些新的成果与相关钻探选址建议能够助力我国大洋钻探事业发展,提升南海地球系统科学研究水平,为建设“海洋强国”作出积极贡献。

参 考 文 献

曹楚奇,熊发挥,杨胜标,徐向珍,刘飞,牛晓露,冯光英,邱添,杨经绥. 2022. 南海北部陆缘新生代玄武岩地球化学特征及成因. 地质学报, 96(8): 2683~2704.

Chevalier Marie-Luce, Tapponnier Paul, Trinh Phan Trong, Briais Anne, 李海兵,徐锐. 2022. 华南、巽他和掸邦地块之间边界断裂上新世—第四纪活动的大尺度反演. 地质学报, 96(8): 2833~2852.

杜文波,朱荣伟,熊量莉,朱红涛,舒誉,黄众. 2022. 珠江口盆地恩平凹陷恩平组物源体系分析及未来大洋钻探建议. 地质学报, 96(8): 2788~2799.

冯光英,刘飞,牛晓露,杨经绥. 2022. 海南岛晚新生代石山组橄榄玄武岩的地幔源区组成及动力学机制. 地质学报, 96(8): 2725~2742.

李志康,李春峰,朱埭,黄亮,刘文潇. 2022. 南海高分辨率岩石圈有效弹性厚度及其影响因素分析. 地质学报, 96(8): 2670~2682.

刘栋梁,李海兵,王平,潘家伟,郑勇,朱训璋. 2022. 南海北部盆地新生代物源对周边主要河流演化的响应. 地质学报, 96(8): 2761~2774.

刘仲强,索艳慧,杜晓东,蔡国富,程昊晔,王光增,周洁,刁一笑,付新建,李三忠. 2022. 南海北部陆缘大陆架科学钻探选址:珠江口盆地沉积源汇启示. 地质学报, 96(8): 2775~2787.

苗晓明,冯秀丽,李景瑞,肖倩文,但孝鹏,尉建功. 2022. 南海甲烷渗漏研究进展及其对我国南海科学钻探选址的启示. 地质学报, 96(8): 2877~2895.

牛晓露,冯光英,刘飞,杨经绥. 2022. 海南岛北部晚新生代玄武岩成分演化及成因讨论. 地质学报, 96(8): 2705~2724.

秦绪文,张宝金,赵斌,路允乾,陈玺,王利杰,许振强,张如伟,耿明会,杨振,李建平,吕文超,尉建功. 2022. 南海海盆区莫霍面分布规律及其对深部钻探的意义. 地质学报, 96(8): 2635~2646.

邱燕,黄文凯,尉建功,韩冰,谢志远,杜文波. 2022. 南海西南次海盆剪刀式扩张. 地质学报, 96(8): 2743~2760.

万志峰,吴婷婷,张伟,苏丕波,钟思玲,张金锋,罗钧升. 2022. 海底泥火山形成机制——南海台西南盆地泥火山钻探建议. 地质学报, 96(8): 2906~2916.

王伟平,姚永坚,蔡周荣,殷征欣,朱荣伟,尉建功,鞠东. 2022. 中建南盆地后扩张期 T_5 和 T_3 不整合面的发育特征及对南海科学钻探的意义. 地质学报, 96(8): 2822~2832.

尉建功,苗晓明,李景瑞,李文静,张云山,但孝鹏. 2022. 南海北部冷泉碳酸盐岩研究进展及其对大洋钻探选址的指导意义. 地质学报, 96(8): 2800~2808.

吴婵,李海兵,姚永坚,张伙带,刘栋梁,尉建功. 2022. 莫霍计划的回顾与展望. 地质学报, 96(8): 2657~2669.

吴时国,秦永鹏,马永生,田雷. 2022. 开展南海碳酸盐岩台地大洋钻探的建议:揭示台地演化的控制因素与淹没机制. 地质学报, 96(8): 2809~2821.

杨少华,李海兵,潘家伟,郑勇,柳畅. 2022. 台湾-吕宋双火山弧的可能成因:菲律宾板块北西向加速运动. 地质学报, 96(8): 2917~2926.

杨晓东,张锦昌,邱强,林间. 2022. 南海北缘钻探选址:滨海断裂带大型海洋地质灾害研究. 地质学报, 96(8): 2853~2865.

张慧慧,许鹤华,姚永坚,邵佳,纪顺奎. 2022. 南海西南次海盆扩张期热液循环与洋壳增生的数值模拟. 地质学报, 96(8): 2927~2941.

张伙带,许振强,姚永坚,沙志彬,吴婵,杨振,李学杰,杨楚鹏,朱荣伟,汪俊. 2022. 发育大洋斜长花岗岩的南海管事平顶海山:深部地壳和莫霍面钻探的优选区?. 地质学报, 96(8): 2647~2656.

郑勇,李海兵,潘家伟,杨少华,龚正. 2022. 长江第一弯虎跳峡的贯通——来自于地表地貌和弹性挠曲的数值模拟分析. 地质学报, 96(8): 2942~2954.

钟广见,苏丕波,冯常茂,刘胜,孙鸣,易海,赵静,赵忠泉. 2022. 南海东北部潮汕坳陷中生代构造特征及其油气勘探潜力. 地质学报, 96(8): 2896~2905.

朱荣伟,杜文波,熊量莉,汪俊,张伙带,姚永坚,蔡观强. 2022. 琼东南断裂带地质-地球物理特征及未来科学钻探建议. 地质学报, 96(8): 2866~2876.