综 述

海沟系统研究的进展与前沿

李三忠^{1,2*}, 索艳慧^{1,2}, 朱俊江^{1,2}, 戴黎明^{1,2}, 张瑞昕^{1,2}, 刘欣颖^{1,2}, 乔璐璐^{1,2},
刘吉文³, 张晓华³

1. 深海圈层与地球系统前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237;
3. 海洋生物遗传与育种教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266100

* 通讯作者, E-mail: sanzong@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-12-20; 收修改稿日期: 2020-06-14; 接受日期: 2020-06-22; 网络版发表日期: 2020-08-13

国家自然科学基金重大计划重点项目(批准号: 91958214)、国家海洋局专项项目(编号: GASI-GEOGE-1)、国家自然科学基金委-山东省人民政府联合基金项目(编号: U1606401)资助

摘要 海沟是地球物质与能量激烈交换地带,是深浅部地质过程的耦合地带,在地球系统科学研究中占有重要地位. 海沟系统是以海沟为核心的多个圈层相互作用的整体,是多学科融合创新的阵地. 海沟地貌形态是深部动力系统和浅部地表系统相互作用的重要界面,其动力学演化及机制一直是地球科学系统的基础科学问题之一,它涵盖了地球表层至深部壳-幔间跨圈层、跨相态、跨时空等一系列的耦合过程,是地球系统不同圈层间能量交换和物质输送、循环作用的产物. 同时,海沟系统动力学演化不仅对物理海洋、海洋生物、海洋化学及海洋地质等过程起着支撑作用,而且对全球的物质能量输送和沉积物-水-元素循环过程起着重要的调控作用,也是导致成矿-成藏-成灾系统变迁的主要过程之一. 因此,海沟系统的调查研究是解决“地表沉积动力过程与深部壳幔动力机制协同耦合作用及其资源-环境的长期效应”等重大前沿科学问题的关键. 文章着重综述了近10年来海沟系统研究新进展,特别介绍了全球变化下深渊表层沉积源-渠-汇机制和元素迁移-循环机制、决定生命起源的超临界碳-氮耦合循环机制、促进生命进化的烷烃降解通路的微生物异养代谢新机制等新成果,也论述了海沟系统的热液成矿效应、冷泉水合物成藏效应、大地震成灾效应等方面的研究进展,这些新成就突出体现了生命科学与地球科学交叉的广阔新领域.

关键词 海沟系统、流固耦合、海陆耦合、深浅耦合、俯冲

1 引言

深渊海沟是深海的极端环境, 通常指超过6000m水深的槽型深海地貌, 但也有界定为6500m的(Jamieson, 2015), 是地球上独有的地貌单元(Stern, 2002). 其

中, 马里亚纳海沟深度达10971m, 被誉为地球的第四极, 与地球上独有的板块俯冲过程密切相关. 全球海沟长度大约55000km(Lallemand, 1999), 与洋中脊60000km的总长度相当(Keary和Vine, 1990). 全球有37条深海沟(图1), 长度从300km(东吕宋)到2700km(阿留

中文引用格式: 李三忠, 索艳慧, 李俊江, 戴黎明, 张瑞昕, 刘欣颖, 乔璐璐, 刘吉文, 张晓华. 2020. 海沟系统研究的进展与前沿. 中国科学: 地球科学, 50(12): 1874–1892. doi: [10.1360/SSTe-2019-0301](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0301)

英文引用格式: Li S, Suo Y, Zhu J, Dai L, Zhang R, Liu X, Qiao L, Liu J, Zhang X. 2020. Advance and frontier of the research on trench system (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 50(12): 1874–1892, doi: 10.1360/SSTe-2019-0301

早期除了知道海沟较深、环境极端、是俯冲带的浅表表现、有生命存在之外，人们对海沟其他方面的认知较少。迄今对海沟在科学上意味着什么本质问题依然认识有限，例如海沟的碳汇效应如何、大地震如

1875

环和效应, 而俯冲隧道也只是俯冲工厂的上下板块之间相互作用的通道(Zheng和Zhao, 2017), 后面这些术语的内涵更倾向于内生过程; 洋陆过渡带(Li等, 2019)是一个更为宽泛的概念, 主要是强调大洋和大陆板块相互作用所能波及的一个过渡地带。构造上, 海沟系统只是洋陆过渡带靠海一侧的重要地带, 但海沟系统还涉及岩石圈外的其他邻近圈层。

2 国际海沟研究现状

20世纪中期以来, 美国、日本、英国、新西兰等几个先驱国家, 使用潜标、沉积柱采样器、生物诱捕器、抓斗、深拖、载人或无人潜水器、着陆器、大洋钻探等平台或技术手段, 从北到南对阿留申、千岛-堪察加、日本、菲律宾、马里亚纳、爪哇、克马德克、汤加、波多黎各等深渊海沟进行了零星的科考工作。此后, 深部生物圈、暗生命过程得到高度重视。

2.1 国际大科学计划实施(2000~2015年)

进入21世纪, 海沟开拓者们希望获取越来越深的样品, 这助推了海沟探索活动。日本JAMSTEC研发了*Kaikō*-7000深潜器, 但很快就被ABISMO(automatic bottom inspection and sampling mobile)深渊采样器取代(Yoshida等, 2009)。虽然ABISMO是只能获取少量水和沉积物样品的小型低成本取样器, 但2007年在伊豆-小笠原海沟9707m、2008年在挑战者深渊10257m处分别获得了样品(Yoshida等, 2009)。2009年5月31日美国伍兹霍尔海洋研究所利用AUV、新的HROV *Nereus* 对挑战者深渊10903m开展了巡航, 开启了全新的海沟环境调查, 并可开展深渊动物群原位定量调查(Bowen等, 2009)。

据不完全统计, 至2013年, 国际上共组织了47个深渊调查航次, 其中生物资源调查占66%。特别是2006年开始, 日本东京大学和苏格兰阿伯丁(Aberdeen)大学联合实施了国际上第一个海沟计划——超深渊环境与教育计划(HADal environments and educational program, HADEEP), 持续了5年(Jamieson, 2015)。HADEEP是一个日本和英国的国际合作计划, 先后在5条海斗深渊中投放了全海深着陆器, 侧重对深渊生命科学开展了系统研究。随着全海深调查能力提高, 2009年美国伍兹霍尔海洋研究所使用HROV全海深设备重新调查海沟环境。

随后, 美国国家科学基金会支持了HADES计划(2012~2015年), 可视为针对深海沟的第二个国际计划, 由美国伍兹霍尔海洋研究所Tim Shank博士领导, 使用全海深“海神号”无人潜水器和着陆器对克马德克海沟进行了研究, 拟解决海斗深渊生态学的最前沿科学问题。

期间, 美国Scripps海洋研究所Eloe等(2011)发现海沟水体微生物具有更多的有机质转运和利用相关的基因。日本JAMSTEC的Nunoura等(2015, 2016)发现海沟深渊区具有丰富的异养微生物, 推测其在深渊生源要素循环中发挥重要作用。德国图宾根大学Wagner等(2014)从海沟放线菌中发现了系列具细胞毒活性的吩嗪类化合物。通过上述研究, 欧美及日本获得了一批深渊微生物资源。此外, 英国阿伯丁大学Jamieson等(2010, 2013)、Jamieson(2015)在深渊区(日本海沟7703m)发现了包括拟狮子鱼在内的多个动物门类的新物种。美国惠特曼学院Yancey等(2014)在马里亚纳海沟8145m发现了鱼类新种, 刷新了鱼类栖息深度的记录。日本JAMSTEC的Kobayashi等(2012)发现深渊钩虾具有独特的纤维素降解酶。以上研究彻底改变了人们的认识, 肯定了深渊海沟中存在大量的特有生物, 这些生物具有特殊的代谢途径。

实际上, 从海洋地质学角度, 自20世纪末至21世纪初, 美国国家自然科学基金委员会就组织了一系列以洋陆耦合、深浅耦合过程为重要研究内容的大型国际研究计划, 包括大陆岩石圈破裂(RCL)、发震带(SEIZE)、俯冲工厂(SubFac)、地表系统从源到汇(S2S)四大主题的大陆边缘计划(MARGINS, 1998~2010)(the MARGINS Office, 2004), 以及正在实施的“地质棱镜”计划(GeoPRISMs, 2010~2022)(the MARGINS Office, 2010)。这些研究计划不仅发展了地表系统地貌动力过程的演变机理以及其在成矿成藏(如水合物)、长期环境演变中所起作用的认识, 而且也在地貌动力环境与海底灾害(海底滑坡、海啸、海啸地震)的预测提供了重要依据。

由此, 在国际上, 大陆边缘(包括部分海沟)的研究备受重视。综合大洋钻探计划(IODP)与国际大洋发现计划(IODP)、国际洋中脊计划(Inter-Ridge)、地质棱镜计划(GeoPRISMs)等大科学计划都将大陆边缘演化和成因机制作为重要研究主题(李家彪, 2008), 并取得了显著成果。如古海洋学、俯冲工厂的提出, 打破了单一学科的局限, 运用系统论的研究范式和方法, 特别是

对活动大陆边缘的各种复杂地质过程进行了综合分析。海沟系统也是这些国际计划的重要探测目标与研究对象。

2.2 深渊综合调查技术快速发展(2015~2019年)

深海沟因其极端环境要求有特殊技术手段, 这个区域也必然蕴藏着一些重要的科学问题。中国秉持技术先行的原则, 2002年科技部将深海载人潜水器研制列为863计划重大专项, 启动了“蛟龙号”载人深潜器的自行设计、自主集成研制工作。该深潜器于2012年6月在马里亚纳海沟创造了下潜7062m的中国载人深潜纪录, 为世界同类作业型潜水器最大下潜深度纪录。但是, 此前, 首次人类在挑战者深渊由瑞士Jacques Piccard和美国Don Walsh乘坐载人潜器(human-occupied vehicle, HOV)Trieste号进行过海底观察(Piccard和Dietz, 1961); 甚至20世纪70年代, 导演Cameron(詹姆斯·卡梅隆)成功深潜到了西南太平洋新不列颠海沟的7260m和8221m的新深度, 并发现了银莲花(anemones)和水母(Lemche等, 1976)。2012年3月26日, 詹姆斯·卡梅隆乘深海挑战者号(Deepsea Challenger)深潜器在挑战者深渊再次打破自己的纪录, 到达了10898.4m的新深度, 维持了3h返回海面, 成为潜入这个深渊最深处的世界第一人。该深潜器安装有多个摄像头, 可以全程3D摄像, 后被捐赠给伍兹霍尔海洋研究所。

随后在2014年4月10日, 中国科学院正式启动了“海斗深渊前沿科技问题研究与攻关”战略性先导科技专项(B类)项目, 2014年《光明日报》(2014年5月29日12版)登载了彭晓彤研究员撰写的报道“海斗深渊: 触摸地球上最深的海洋”; 但直至2016年, 才开始利用“蛟龙号”深海载人潜水器等于马里亚纳海沟进行科学试验与考察。然而, 因“蛟龙号”下潜深度的能力依然有限, 未能真正到达万米深渊最深处。为此, 2015年, 中国海洋大学就组织全国力量, 立即实施了多学科的“万米深海行动计划”, 多学科综合技术实现了采样深度真正到达万米, 研究持续至今。

随着技术进步, 2016年12月至2017年2月, 上海海洋大学等组成的深渊科学考察队由许云平与崔维成两位教授带领, 利用自主研发的3台全海深着陆器, 成功地在万米深渊开展了一系列科考工作, 不仅成功通过了由中国科学家独立自主研制的3台万米级着陆器(“彩虹鱼”)万米海试, 使得中国具有万米海深开展系列

科考作业的综合能力, 而且在万米深度成功地进行了一系列科学考察作业, 最深下潜到10890m, 获得了非常宝贵的万米深渊的微生物、生物、海水的样本和影像。接着在2017年11月, 中国完成了自主研发的海底10000m潜水器载人球舱出入口、观察窗的开孔工作, 潜水器最核心的部件之一是载人球舱, 是潜航员的主要活动区, 新的球舱主体为钛合金。2019年万米潜水器载人球舱建成, 随后将建造世界上下潜深度最大、最先进的万米载人潜水器。全新一代载人潜水器的载人球舱从选材上就与4500m级“深海勇士号”和7000m级“蛟龙号”不同, 而且计划2020年在世界海洋最深处的马里亚纳海沟进行海试, 预计载人下潜深度将超过10000m。在深渊综合调查技术而非卡梅隆式探险活动方面, 中国即将实现“领跑”世界。

2.3 海沟系统多学科交叉研究(2019年至今)

科学上, 中国在不断向深海深部进军, 至2018年, 中国科学院宣布初步建成了海斗深渊的生物学、生态学、地学等多个学科体系, 并引导攻克了全海深潜水器及探测装备关键技术, 推动了中国深海科学和装备技术向海洋最深的极限进军。深海沟研究得到海洋科学家在内的多学科科学家的高度重视, 深渊阳光缺乏、食物供给匮乏、超高的静水压力、交换缓慢的水年龄、复杂海底地形和活跃的活动构造以及生命、环境和地质的极为独特现象, 推动着相关海洋科学研究进入全新境界, 也成为海洋地质学领域的俯冲工厂、物质循环、俯冲引擎、深碳循环的研究热点。最近, Zhang等(2020)利用中国海洋大学自主研发的深海原位激光拉曼光谱探针在深海热液喷口气泡中首次发现了自然环境下的原位超临界二氧化碳, 这可能类似早期地球水汽界面附近二氧化碳大气层的主要状态, 从而促进了氨基酸和其他有机物的合成、富集和保存。这个过程对生命起源至关重要, 弥补了热液流体中缺少合成氨基酸的关键元素——氮的这个环节, 解决了早期生命起源于热液假说最致命的问题之一。

在科技发展的新阶段, 各国科学家都将目光聚焦在海斗深渊上, 以海沟系统为纽带, 生命科学和地球科学(包括海洋科学)大交叉研究的态势逐渐显现。厘清海沟系统深部精细三维各向异性构造特征, 系统探讨其内在动力学机制、浅部海沟系统与深部俯冲系统耦合机理及其资源、环境、灾害效应也成为当前关注

的热点问题. 全球海沟系统是研究俯冲过程中形成的地质、构造现象的最佳位置, 其中包括俯冲增生、构造底侵和俯冲剥蚀等作用; 同时, 全球海沟系统的位置也是产生8级以上大地震和破坏性海啸的地方, 研究海沟系统的基本结构单元、增生楔和底部俯冲地壳的耦合及其整个俯冲系统的物质能量循环, 都是目前最为关键的科学探索主题. 对海沟系统的研究, 不仅需要从浅部沉积物输运堆积、俯冲增生和俯冲剥蚀、生态环境、海洋流场演变、元素循环、极端环境下的生命过程等开展深入探索, 而且还必须在地球系统科学理念指导下, 结合俯冲隧道中物质转换、俯冲带的基本结构特征、俯冲带水结构或流(熔)体分布和深部地幔楔结构开展系统研究, 并通过各种地震探测方法、电磁方法和地震层析成像方法, 获取完整海沟系统的深浅结构复杂变化特征; 最终需要从海沟表层系统、深部俯冲系统、俯冲工厂、跨圈层地球系统科学高度出发, 开展深海沟表层系统的系统性和整体性研究, 推动地球系统科学发展.

3 深海沟研究进展

地质上, 海沟指示俯冲带的存在, 全球活动俯冲带的总长度约为43500km, 与火山岛弧的总长度大致相

同(von Huene和Scholl, 1991). 根据俯冲带(岛弧区)岩浆活动构造环境、地壳组成及岩浆成因的差异, 可将沟-弧-盆体系进一步划分为两类: 洋内岛弧-洋内弧间盆地-洋内海沟体系(这里简称洋内沟-弧-盆体系)和发育于活动大陆边缘的海沟-陆缘岛弧-弧后盆地(边缘海盆地)体系(图2).

3.1 海沟系统表层过程

海沟系统是地球表层系统重要组成部分, 是沟-弧-盆体系(图2)的海底边界层部分, 主要指海沟附近水圈和岩石圈之间相互作用的海底边界层界面, 是海陆耦合、流固耦合、深浅耦合的关键场所; 因其跨越纬度太多, 还存在冰冻圈与海沟之间的相互作用问题. 其深部延伸的系统组成可以等同俯冲带、俯冲隧道、小地幔楔, 是深、浅部多圈层之间物质和能量交换的激烈场所. 小地幔楔在弧下(subarc)深度部分熔融产生岛弧型岩浆作用, 在弧后(postarc)深度部分熔融产生洋岛型岩浆作用(郑永飞等, 2018). 相对来说, 大地幔楔不属于沟-弧-盆体系, 虽然大地幔楔过程和成因与大洋板块俯冲并停滞在地幔过渡带有关(徐义刚等, 2018), 但是目前对300~600km深度的深俯冲系统过程知之甚少.

海沟可以存在活动的俯冲消减作用, 也可以出现

图2 沟-弧-盆体系构造单元基本组成

(a) 洋内沟-弧-盆体系; (b) 陆缘沟-弧-盆体系

在俯冲带已经死亡的海域, 是一个岩石圈力学强度薄弱的地带. 俯冲过程会引发海沟系统从深部到浅表的一系列变质、变形、岩浆、流体等作用, 不仅涉及壳-幔之间的物质循环, 而且包括大气圈-水圈-岩石圈-生物圈之间多圈层的相互作用. 在一定条件下, 洋壳上部沉积物也可以随俯冲的大洋岩石圈一起消减, 进而经历俯冲系统或俯冲工厂的深部过程. 俯冲的岩石圈(包括洋壳和沉积物)在消减带内的构造销毁过程中, 一部分会持续俯冲到更深部, 乃至滞留在地幔过渡带, 脱水、脱碳等过程还导致深部水循环、碳等元素循环和岩石循环(Zheng, 2019), 进而通过火山喷发等反馈大气圈等.

日本、马里亚纳和中美海沟的深钻孔资料表明, 可能只在很狭窄的地带存在与消减作用有关的强烈变形. 这样狭窄的地带可能是由于巨型冲断带(图2)的高孔隙水压或使板块之间摩擦力降低的其他机制引起的润滑作用所造成的(Dasgupta和Mandal, 2018). 在俯冲消减作用过程中, 还将伴随刮削和(底侵)增生作用, 导致大陆侧向生长. 沿海沟的俯冲作用使得地表处于极不平衡状态, 不同段落俯冲速率(汇聚板块的相对速

度)变化, 导致海沟分段性显著; 垂向上, 可能在仰冲板块中, 造成大幅度的垂直运动. 另一方面, 边缘海盆地中生代岩石圈的老化, 使其像其他大洋区一样发生沉陷, 残留弧本身将因老化洋壳的俯冲对地幔楔的冷却作用而下沉, 此外, 仰冲板块也可能发生切向变形. 这些过程塑造了一个最为重要的多圈层相互作用界面——地貌界面(包括洋陆过渡带地形、海底边界层等).

3.1.1 分段性决定海洋流系格局

人们一般容易注意到岛弧-海沟的连续性, 而忽略岛弧-海沟系统各段的差异性及不连续性. 如从北向南将千岛、日本、小笠原和马里亚纳海沟划作一体(图1和3), 作为太平洋板块向欧亚板块的俯冲边界; 将西南日本、琉球及菲律宾群岛东侧海沟连为一体, 作为菲律宾海板块向欧亚板块的俯冲边界.

实际上, 仔细观察岛弧和海沟的地形等深线, 可以发现, 不仅岛弧不是连续的, 而且海沟也常被一些洋底高原或海岭分隔为不连续的若干分段. 同时, 海沟延伸方向也发生明显转折. 其中, 一些形态和分段可能是海

图3 西太平洋的海沟弧形特征、边缘海盆地分布及海沟系统立体图示

左图西边界流和黑潮实际在琉球海沟、冲绳海槽位置, 这里为了立体展示海沟系统的综合要素和一般特征将其挪到了马里亚纳海沟处

山俯冲的结果(Zhang B等, 2016; Zhang Y等, 2016).

这些沟、弧、盆、岛等地貌构成大洋环流复杂的三维立体边界, 是东亚环形俯冲系统(海沟系统)的产物, 对海洋能量耗散、分配、转换和传递起着重要控制作用, 也使得西太平洋表层水、中层水、深层水和底层水的海洋流系复杂变化, 并诱生了丰富的海洋、气候和生态局地环境的多样性, 如物理海洋中复杂的北赤道流分叉及印尼贯穿流、黑潮路径变化、马里亚纳海沟及吕宋海峡两侧中尺度涡、南海内波, 以及大气中的印度季风、东亚季风和西太平洋暖池的耦合作用、厄尔尼诺等(Hu等, 2015). 地质上不同来源的微地块沿班达等海沟的拼合碰撞及弧后伸展导致生物学上的华莱士线及其修正版的韦伯线、莱德克线、赫胥黎线等迁移变动, 也最为引人关注. 此外, 该区不仅是太平洋和印度洋水体、生物的分割地带, 还是其复杂交互的地带.

3.1.2 孤立性决定极端生态系统

静水压力大、黑暗无光、低温、空间狭窄及构造活跃的海洋极端环境是海斗深渊的主要特征(Jamieson等, 2010), 地理空间上相对孤立. 但是, 这种孤立性、极端条件是否构成了底层生物种属的地理隔离? 不同段落和深度的海沟之间在生态功能上是否有差别? 对生命形式的独特性起到多大贡献? 与其他系统或圈层有何关键的物质能量交换过程? 这些问题迄今依然不清楚. 如此极端恶劣的环境仍然孕育着丰富的生命, 如今已发现深渊区域的近392种生物为深渊环境所特有. 这种高度活跃的生物群落栖息在压力比海平面高出近1100倍的沉积物沟槽中, 曾被认为很可能来自浅层深度并在地震期间落入更深的海沟深处. 另外, 在平面空间上, 深渊生物也存在巨大差异, 相邻海沟之间的群落仅有5%相同; 在垂向或平面上, 深渊生物群落表现出了特有的区域专属性. 因此, 国际生命科学界高度关注深渊内部营养盐分层结构与组成、生命代谢方式、功能过程及演化历史. 然而受到技术制约, 深渊一直是人类难以企及和迄今为止认知最少的地球生态系统之一. 同时, 海洋微生物分解有机物质的终极产物, 如硝酸盐、磷酸盐、氨以及二氧化碳等, 都直接或间接地为上层海洋植物提供主要营养. 在海洋无机营养再生过程中, 微生物起着决定性的作用. 例如, 碳从有机碳中脱离出来变成无机碳, 大多数随着复杂的洋流

运动或者密度的原因向上上浮到浅海地区, 被浅海的动植物吸收、摄取, 再次转变为有机物, 所以说深海微生物的存在以微生物泵的机制对海洋碳平衡产生深层次的影响(图3右侧), 另外还应考虑到海-陆-气的气体交换和相互作用、化学反应和生物链、食物网、微食环导致的营养盐/碳的流动, 并同时作用于全球碳循环, 也涉及跨纬度深海沟不同水文环境的水体交换、循环和年龄格局、平均滞留时间对深渊生态的控制.

3.1.3 弯曲性反映俯冲形变复杂性

岛弧连同其未出露海面的部分, 构成完整的岭脊, 在其内侧陆缘海盆和其外侧的深海沟的衬托下, 显得格外突出. 另一种海岭分布于边缘海盆地或大洋海盆之中, 其两侧没有深海沟, 但岭脊显而易见的高于周邻海盆底部. 前者一般被称为岛弧; 后者为海岭或海脊, 与洋中脊(或洋脊)不同. 在两个岛弧-海沟体系的交接地段, 一般都有海岭将它们分开, 特别是海沟, 不仅被海岭分隔为不同的段落, 而且发生明显的转折. 阿留申弧与千叶弧呈锐角相交, 其角平分线与海底高地及皇帝海岭相连(图3), 海岭高出两侧洋底3000~4000m, 其北端高出海沟底4000m左右; 琉球海沟和西南日本海沟的交角顶端指向朝鲜半岛, 其角平分线对应为九州-帕劳海岭的北段; 台湾-菲律宾岛弧为NNE向或近南北向, 与近东西走向的琉球弧南段为近直角相交, 其角平分线对应为西菲律宾海盆的NW向石化洋中脊; 在马里亚纳弧南段明显转折的地方, 对应为卡罗琳海岭. 岛弧-海沟体系在这些海岭指向大陆的一端, 均向大陆弯曲; 而在海岭与海岭之间的地段, 均向大洋方向弯曲突出(图3).

可见, 西太平洋岛弧-海沟系统有一个显著的特点: 弧形弯曲. 尽管岛弧-海沟系统长短不一, 曲率也不同, 延伸方向不同, 但是几乎所有弧形弯曲的凸面都朝向海洋, 即朝向东或SE方向, 弧的端点或与其他岛屿相连, 或与大陆半岛连接, 弧与弧的夹角有的呈锐角, 且多近似直角, 如千叶弧与阿留申弧的夹角. 对此, 有人提出了一些新的构造模式给予了解释, 比如弯山构造(王倩, 2018)、对开门构造等(Martin, 2007), 但海沟迁移效应(Schellart等, 2008; Müller等, 2016; Liu等, 2017; Ma等, 2019)、海山或洋底高原俯冲效应(Mason等, 2010; Tao等, 2020)、双俯冲系统的动力地形和地表变化的复杂性(Dasgupta和Mandal, 2018)及其所反映

的海沟弯曲性的动力学机制仍有待进一步深入研究.

3.1.4 海洋锋面是全球源-汇过程的最大屏障

海洋物质的源-汇过程不仅仅是海底边界层的沉积过程, 也涉及深部物质循环, 即包括深部源-汇过程. 例如, 洋内弧是洋盆内的岩浆弧, 现存于主体为洋壳的板块之上. 但这种地壳是形成于洋中脊或者弧后扩张中心的洋壳, 洋底高原的部分地壳, 还是俯冲带弧前大洋沉积物或者更早期的洋内弧物质增生形成的地壳这个问题依然没有解决. 构成洋内弧基底岩石的多样性也意味着其本身的复杂多样性, 特别是在马里亚纳岛弧上发现新元古代的锆石, 更是让人琢磨不透其成因, 也许可以考虑洋内弧上覆基底地壳包含大陆地壳, 但可能来自地幔再循环的继承或捕获锆石, 同时也可能是沿海沟底部的陆缘物质随着潜流带到海沟后经历俯冲循环所致. 事实上, 现今活跃的洋内弧中只有中、西阿留申岛弧的地壳是起始于洋中脊的. 尽管洋内弧相当于硅镁质地壳岛弧(Saunders和Tarney, 1984), 也就是近似相当于Wilson(1989)提出的“大洋岛弧”. 但就是在东阿留申海沟, 也发现有大量陆缘物质构成的海底扇, 其陆缘物质如何突破水文梯度或流系切变锋进入海沟? 其俯冲后产生的岩浆系统中有多少继承锆石保存到了洋内弧?或许这些研究可以解释马里亚纳岛弧基底的发现.

除洋内弧之外, 大陆弧和日本型岛弧是典型陆壳构成的岛弧. 其深海一侧为海沟, 有些浊流沉积, 但海沟几乎都是陆源物质进入深海平原的一道不可逾越的鸿沟. 研究陆地-深海间物质输运过程可深入揭示地史期间深海沉积过程和途径, 也是理解地史期间深海沉积物中陆源物质主要是风成沉积的根本所在.

然而, 目前海洋物质的源-汇过程的研究还处于攻克跨陆架物质输运方面. 黄海、东海是亚洲大陆与西太平洋物质和能量交换的重要海域之一(Wang等, 2011; Li等, 2014), 在复杂的环流动力背景下, 陆源物质的跨陆架输运是当前海洋地质学的研究热点. 目前的研究主要甄别了跨黄东海陆架物质输运的三条路径(乔璐璐等, 2017), 即苏北沿岸流作用下向济州岛西南输运、浙闽北部向东搬运和台湾暖流向东分支作用下跨陆架输运. 其控制机制有水深地形、陆架环流、冬季风、水体斜压结构等(Wu, 2015; Liu等, 2018; Wu和Wu, 2018), 但尚未取得共识. 由反向流系所形成的海

流切变锋构成了陆架近海物质跨陆架输运的首道屏障(Liu等, 2015; Qiao等, 2020). 而受海沟地形控制的太平洋西边界流, 如黑潮及其延伸体, 则是对物质从大陆架向深海输送的再次阻挡, 形成了全球最显著的源-汇分割面. 但目前研究结果多基于叶绿素、水温、悬浮体等表层遥感资料分析获得, 陆源物质尤其是中下层高浓度泥沙跨陆架向深海输运的机制是否与等密度流或界面相关, 还有待深入研究; 此外, 其输运通量, 尤其是高能事件, 如台风、冬季风暴等的作用也还有待研究.

环境海洋学家现今最为关注的海洋微塑料是如何进入深海海底边界层乃至海洋生物体内的? 这也需要探索这些物质的源-汇过程如何突破切变锋、海沟的机制, 生物输运途径的源-汇过程也许值得探索.

3.1.5 海沟流体是沟通多圈层过程的关键

弧后扩张中心, 是众所周知的热液活动场所之一. 热液现象包括白烟囱和黑烟囱, 西南太平洋的劳盆地和马努斯盆地都存在的成矿作用就是黑烟囱成矿流体过程的产物, 东斯科舍洋中脊热液羽状流也同样(German等, 2000). 在这些弧后构造中, 热液活动和玄武质的以及硅质的火山中心都是相关联的(Ishibashi和Uraabe, 1995). 然而, 越来越多的证据表明, 沿着洋内弧前缘, 淹没在水中的火山也是重要的热液活动的场所. 海沟浅俯冲部位是深海沉积物大量孔隙水脱水地带, 这些水不仅可以导致地幔楔橄榄岩蛇纹石化(图3), 而且可以直接形成热液羽状流, 乃至使得前弧增厚的增生楔发生熔融, 形成花岗质侵入岩, 如日本高知海岸的南海海槽弧前所见. 最早对水下岛弧热液活动的系统调查表明, 克马德克岛弧南部的火山都存在热液羽状流(plume). Baker等(2003)给出了这些热液羽状流分布以及它们的微粒组成成分的详细观测结果. Massoth等(2003)给出了热液羽状流内气态和液态成分的化学特征, 并把它考虑为对岩浆贡献的证据. 此外, 热液活动的频率相对于全球水下岛弧总长度的比例表明岛弧的热液排放很可能代表了全球总排放量的相当大的一部分. 而且, 岛弧的热液喷口比洋中脊和弧后洋中脊的喷口要浅得多, 意味着岛弧的热液排放具有极大的环境影响(de Ronde等, 2001).

马里亚纳和伊豆-小笠原岛弧前缘的一些火山同样有热液活动, 而且正在形成金属矿床. 伊豆-小笠原岛弧和克马德克岛弧的一些热液喷口位于硅质的火山

喷口中, 与富Au的金属矿床相关; 此外, 在阿留申海沟、日本海沟的增生楔中还可可见脉状热液型金矿, 这些过程都与海沟处大量成矿流体活动密切相关(Shikazono, 2003). Iizasa等(1999)认为, 这些金属矿床可为黑矿型矿床提供最接近的类比物. 这也引发了一种可能的情况, 即火山喷口是浅部岩浆房坍塌形成的, 且岩浆房的热驱动着热液系统. 当然, 地质流体不只是热液, 还包括很多形式的其他流体或熔体, 甚至超临界流体(Zheng, 2019; Zhang等, 2020). 这些流体或熔体在海沟系统的各个环节起着什么作用, 迄今没有系统认知, 例如, 不同海沟地段, 不同圈层、各种形式的流体及其地球化学属性如何控制了成矿分段、生态分段等.

3.1.6 海沟地貌是海陆内动力相互作用的变形表现

近年来, 对海沟进行的连续测深、人工地震、深海钻探等工作, 特别是20世纪70年代实施的“地球动力学计划”一系列国际海洋调查, 从许多方面证实, 海沟的基本构造活动是大洋岩石圈板块向大陆或大洋岩石圈板块的俯冲. 日本上田诚也和杉村新(1979)、Uyeda和Kanamori(1979)在研究俯冲带的构造类型时, 不仅提出俯冲拖曳力才是驱动板块运动的根本动力的认识, 而且把海沟分为两种类型: 智利型和马里亚纳型(图4). 但是, 郭令智(1986)认为, 在弧-沟-盆体系中, 除智利型、马里亚纳型海沟外, 还有苏门答腊型, 为斜向俯冲产生的走滑型俯冲带, 弧后也可因为走滑拉分而形成陆缘海盆, 但这不同于传统意义上的垂直岛弧的拉张作用导致的弧后盆地. 实际上, 日本海、南海都属于这种走滑拉分形成的陆缘海盆, 并非弧后盆地(Zhang Y等, 2016). 为此, 本文从地质地貌角度, 总结为三种海沟系统或大洋俯冲带类型.

(1) 智利型海沟系统(图4a): 因与海沟垂直的两板块间相互作用摩擦力强, 具有较缓的俯冲角, 易于诱发大地震, 且跨窄陆架物源丰富, 因此海沟沉积了巨厚沉积层, 水深变浅, 如智利-秘鲁海沟深度仅为6~7km. 由于两板块间俯冲的挤压力巨大, 楔入过程不仅使海沟出现凸向陆地的弧形, 而且俯冲的大洋板块一侧斜坡发育张性断层, 导致俯冲板片顶面粗糙, 易于携带沉积物进入俯冲隧道; 向陆侧方向大陆坡逐渐过渡为逆断层, 其断面倾角越向大陆方向越大, 因而岛弧后侧不出现断陷盆地, 智利型海沟系统伴生的岛弧属陆缘弧.

图4 智利型(a)、日本型(b)和马里亚纳型(c)活动板块边缘组成

(2) 日本型海沟系统(图4b): 具有较陡的俯冲角, 两板块间侧向摩擦力强, 进而诱发大地震, 乃至日本311和苏门答腊海啸地震, 因海沟沉积巨厚, 其水深变浅. 两板块间俯冲的巨大压扭性剪切力会使海沟向洋侧的斜坡陡峭, 海沟曲率较小, 伴生走滑断层, 向陆侧方向出现拉分盆地或进一步形成斜向扩张的小洋盆, 拉分盆地或陆架盆地阻挡了绝大部分陆缘碎屑物质, 例如, 南海、日本海、安达曼海、加利福尼亚湾等.

(3) 马里亚纳型海沟系统(图4c): 大洋俯冲板片因相变和重力拉张作用, 不仅俯冲角很大, 而且上、下板块间以垂直海沟的拉张力为主, 海沟平面曲率较大. 这种俯冲板片地堑-地垒相间的断陷构造导致在海沟向陆的侧壁上无远洋沉积物的增生, 相反, 在海沟洋侧斜坡的断陷低洼处充填有远洋沉积物. 这些远洋沉积物可能被持续俯冲, 直到带入上地幔而被消减. 由于这类海沟挤压作用微弱, 所以一般没有大地震发生.

此外, 上田诚也和杉村新(1979)还从演化角度认为, 日本海沟在中新世时属马里亚纳型, 上新世时则

转变为智利型(图4c), 现今依然很难理解洋内的马里亚纳型怎么会转变成陆缘的智利型. 本文根据岛弧地壳基底和综合地质地貌特征, 将活动板块边界或海沟分为具有显著差别的三类(图4), 但还可以继续从作用方式实施次级分类. 例如, 琉球海沟不完全是俯冲相关的日本型海沟, 某些段落也为转换断层型. 可见, 海沟的构造属性还值得深入精细划分, 俯冲构造过程决定着附近一系列地质地貌过程的巨大差异, 特别是对构造地貌的一级塑造.

3.2 海沟系统深浅部耦合效应

海沟是俯冲板片开始下插进入地幔的场所, 从俯冲板片上面刮削下来的深海沉积和洋壳碎片组成混杂堆积体, 聚集在上覆板块并构成外弧(包括弧前增生杂岩及其上覆的弧前盆地, 图2); 俯冲板片随着深度增加发生部分熔融, 形成的岩浆穿过地幔楔, 进而上升到浅部而成为火山弧. 如果火山弧发育于大陆边缘, 如南美洲安第斯山, 则称为陆缘弧; 若位于洋内, 则为洋内弧, 如琉球弧、菲律宾弧等. 可见, 海沟系统包括洋-陆俯冲产生的活动陆缘系统和洋-洋俯冲产生的洋内俯冲系统. 因此, 在地质体中准确识别古俯冲带、混杂体和岩浆弧的配置、展布、时代和演化等, 对深时地质时期板块构造格局重建极其重要.

大洋板块向毗邻大陆板块之下俯冲消减或洋-陆汇聚, 可导致大陆边缘强烈活动. 这种大陆边缘往往发育强烈的地震和火山活动, 如亚平宁半岛、亚德里亚海岸、克里特岛、爱琴海诸岛、苏门答腊、安第斯等, 属于活动大陆边缘. 活动陆缘从洋到陆可分为海沟、弧沟间隙(包括非火山外弧和弧前盆地)、火山弧和弧后盆地等构造单元(图2). 海沟系统相关的深部过程产生的浅部效应研究进展及科学问题概述如下.

3.2.1 海沟系统的成盆机制与沉积响应

(1) 海沟盆地: 是大洋岩石圈弹性挠曲, 大洋板块俯冲下插到岛弧之下的产物(图2及图3). 其主要形成机制是俯冲板片的挠曲和沉降. 海沟通常是的滑塌物质的堆积场所, 物源来自大陆架(或岛架)或大陆坡(或岛坡)的陆源或弧源物质以及海沟侧斜坡的碎屑物质. 同时, 俯冲刮削下来的深海沉积物及大洋岩石圈的构造滑脱物质, 也堆积在海沟底部, 形成来源复杂的混杂沉积建造. 在其陆侧内壁为变形强烈的增生楔状体. 海沟

与大洋沉积物的不同之处在于, 前者含有大量粗碎屑物质(如浊积岩)、火山建造(如海山玄武岩)及洋壳超基性物质(如底辟式蛇纹岩). 值得提及的是, 在海沟沉积物中可见放射虫等硅质微体化石, 但很难找到远洋钙质微体生物化石, 这可能是因海沟的深度超过CCD面, 远洋带来的钙质生物残骸遭到溶解的缘故. 海沟盆地及海沟附近发育丰富成因的沉积物, 是沉积学研究的重要对象, 是地表过程和古全球变化的档案库.

(2) 弧前盆地: 发育于海沟轴与岩浆弧之间的弧-沟间隙区内(图2). 其基底可为陆壳或减薄陆壳, 或前人称的过渡壳, 也可以是因俯冲增生而圈闭的残留洋壳, 或直接叠覆于岩浆弧与俯冲杂岩或残留洋壳与俯冲杂岩之上. 俯冲可以导致地幔冷却和俯冲侵蚀(subduction erosion)以及沉积负载均衡下降, 这也是弧前盆地沉降的主要原因, 为当前动力地形研究的重要对象. 弧前盆地随着海沟前进或后撤会发生迁移, 因此, 根据当前弧前盆地记录, 可以揭示古海沟在平面上前进或后撤的运动轨迹(Suo等, 2019).

(3) 弧内盆地: 走向上, 通常平行于岛弧延伸, 由正断层围限(图2). 其基底为陆壳(洋内弧例外), 其成因可能与深部岩浆上升使岛弧地壳隆升产生的区域拉张构造有关, 也可能与局部火山和构造诱发的沉降有关, 还可能同初期弧间盆地发育有关. 因此, 通过浅部盆地迁移过程研究可揭示深部小地幔楔演变过程和海沟迁移过程.

(4) 弧间盆地: 位于活动岛弧与残留弧之间(图2), 通常被认为是由弧内扩张作用从弧内盆地演变而来. 其基底为减薄陆壳或初始洋壳, 通常为从岩浆弧分裂的残留地质体. 洋内弧和陆缘弧受拉张作用而分裂, 直到出现海底扩张, 因而其岩浆活动与弧后盆地有类似之处. 深海钻探表明, 枕状玄武岩岩流在弧间盆地中常见, 其成分大多类似于洋中脊拉斑玄武岩, 因而与海底扩张有关, 弧间盆地也是研究地幔楔过程的良好场所.

弧间盆地不完全等同于弧后盆地, 例如, 当活动岛弧与残留弧之间的盆地因俯冲极性反转向活动岛弧下俯冲时, 该盆地实际位于活动岛弧的前缘, 而不是后缘, 所以不能称为弧后盆地. 但也不能称为弧前盆地, 一则因为弧前盆地已有专门意义, 二则弧前盆地基底一般为陆壳. 当洋壳向活动岛弧下俯冲, 导致活动岛弧分裂, 出现残留弧后盆地. 如四国-帕里维西纳海盆

进一步演化为过渡壳或洋壳基底的盆地时, 该盆地实际位于活动岛弧的后缘, 所以它为弧后盆地。

3.2.2 陆缘形变与海沟系统的后撤过程

海沟底部沉积层产状多数由洋侧向陆侧倾斜, 且陆侧产状往往紊乱, 这是遭受挤压作用的反映, 总体反映海沟盆地是一个饥饿型盆地, 即俯冲产生的垂向空间快于沉积堆积速率, 导致地层倾斜。海沟洋侧斜坡受一系列的正断层错动而呈沟状地形, 且越靠近沟底, 断错规模和落差越大, 表明海沟底和洋侧斜坡受到垂直海沟轴的拉张作用, 第一主应力是垂向的, 这似乎佐证了俯冲是板块运动的驱动力假说; 而海沟陆侧斜坡多为逆断层, 越靠近大陆, 其断面倾角越大, 表明海沟的陆侧受到了渐强的挤压作用(徐茂泉和陈友飞, 1999), 但更可能体现了俯冲板片的阻挡力变化, 或大陆板块前展逆冲过程中的构造底侵过程, 因而迄今存在海沟迁移是上覆大陆板块主导还是俯冲大洋板块驱动之争。然而, 这些研究如能配合断裂年代学工作, 也有可能揭示该过程实质是海沟系统的前进式俯冲, 而不一定是大陆前进、海沟后撤。但是, 也有一些例外, 如台湾东部东西向的琉球海沟中, 沉积地层水平, 反映其形成于张性环境, 没有遭受挤压而变得混乱的

地震反射结构, 这可能是与沿这段海沟的局部走滑拉分作用或斜向俯冲有关。最近, Suo等(2014, 2015)通过东海陆架盆地大量地震剖面解析, 同样揭示了这个海区新生代以来的岩浆岩年龄分带现象, 发现新生代岩浆作用自晚中生代持续向东迁移的规律。这可能是太平洋板块新生代俯冲后撤的确切佐证, 俯冲后撤也导致浅部安第斯型大陆边缘向日本型大陆边缘转换, 出现东海陆架盆地裂陷的形成, 同时, 巨型海岸山脉的地形倒转而沉入海平面之下(Liudmila等, 2018)。因此, 俯冲后撤导致的海底地形的变化巨大, 今后值得深入开展相关动态模拟工作(Dai等, 2020), 以揭示深部过程如何影响浅部海沟系统和邻区的演变。

活动型大陆边缘的构造带具有明显的单向特征。环太平洋构造带是中生代以来, 特别是印支晚期以来或200Ma形成和发展起来的(Li等, 2012, 2019), 是太平洋演化过程中与周围大陆板块相互作用的产物。环太平洋构造带通常分为内、外两带, 内带位于陆侧, 主要是中生代构造带; 外带位于洋侧, 主要是新生代构造带。其构造活动性具有自陆向洋迁移趋势, 在西太平洋边缘尤为突出(Li等, 2012; Suo等, 2014)。伴随不同的构造带迁移机制, 海沟盆地中沉积物变形机制也不同。Boillot(1979)提出了一个仰冲板块边缘的变形

图5 不同倾角俯冲带产生不同形变(Boillot, 1979)

理论模型(图5), 不仅揭示了更为复杂的陆缘变形过程, 而且给出了海沟盆地中沉积充填模式、沉积物变形的差异机制. 该模型主要讨论正向俯冲作用的变形效应, 其原理是: 一个给定的剪切面 C_1 可能与另一个共轭剪切面 C_2 有关, 这时, 压应力(FF')沿 C_1 和 C_2 之间锐夹角的平分线发生作用. 如果将俯冲带(0~100km深度范围)视作 C_1 剪切面, 相应的冲断层即是所谓的同向逆冲断层. 而共轭剪切面 C_2 相应的冲断层, 因其倾向与俯冲带的倾向相反, 则称之为反向逆冲断层. 可见, 在缝合线判断俯冲极性时, 有必要考虑这种复杂性.

当俯冲板块内平面上出现剪应力时, 产生平行海沟轴向的平移断层. 由于斜向俯冲的方向不同, 岛弧或陆缘可出现左旋或右旋的平移断层. 当两板块之间的汇聚方向与板块边界的交角小于 45° 时, 更有利于形成这种平移断层. 特别注意的是, 走滑断层靠洋侧的板片将与斜向俯冲的大洋板块运动方向一致. 从图5所表示的模型也可以看出, 岩石圈汇聚带的形式在一定程度上取决于贝尼奥夫带的倾角和倾向; 大陆边缘块体运动方向与洋侧板块运动方向耦合与否, 应视具体情况加以分析. 此外, 这种不同变形机制不仅决定了海沟盆地会发生俯冲增生而转变为大陆侧向增生楔, 还是会遭受俯冲侵蚀而进入俯冲隧道, 而且也决定着海沟系统的浅表各级尺度的地形地貌特征.

中国东部海域的海沟系统作为西太平洋活动大陆边缘的重要组成部分, 其形成与演化蕴含着丰富的大陆边缘形成与演化的信息, 也成为认识西太平洋地区板块相互作用、大陆边缘演化、边缘海动力机制及其资源形成的重要窗口(李家彪, 2005, 2008). 从中国大陆到西太平洋大陆边缘的新生代板内盆地、陆架盆地到边缘海盆地具有成因上的紧密联系, 是研究洋-陆相互作用的重要场所. 因此, 中国东部及邻区和海域海沟系统也是海洋地质界重要的研究对象, 特别是50Ma以来的构造迁移对这些从陆架到海沟的盆地成因有着决定作用, 值得深入探索.

3.2.3 海沟系统的俯冲侵蚀和增生过程

海沟是俯冲带的浅部表达, 俯冲带浅部可以发生增生也可以发生侵蚀, 其作用分别称为俯冲增生和俯冲侵蚀(von Huene和Scholl, 1991; Clift和Vannucchi, 2004), 俯冲带也分别称为增生型俯冲带和侵蚀型俯冲带.

(1) 俯冲侵蚀过程. 侵蚀型俯冲带与增生型俯冲带形成鲜明的对照, 在海沟形态上也有显著体现. 侵蚀型俯冲带的上覆板块前缘被切蚀而不是加积, 大陆被破坏而不是增生, 陆壳面积在耗减而不是拓展, 弧前区及海沟陆侧坡在下沉而不是抬升, 在那里显示出引张而不是挤压. 上覆板块前缘和底面受侵蚀过程中地壳被侵蚀而变薄, 可能是造成俯冲带上方陆壳大规模沉降的原因之一.

其相对应的板块边缘称为侵蚀型边缘, 即无巨型增生楔形成, 或仅有少量刮落的洋底沉积物堆积下来, 增生楔宽度小于5km, 堆积在靠海沟10~15km范围内. 在非增生边缘, 刮落消减的沉积物量远大于可能增生的沉积物量. 全球这类边缘总长度可达19000km, 通常发育于沉积物输入比较贫乏的海沟地段, 海沟底沉积层厚度小于500m, 大洋板块上几乎全部的沉积物都能有效地俯冲于上覆板块岩石圈之下. 基于这一条件, 非增生边缘主要分布在远离大陆的西太平洋洋内弧-海沟体系, 包括伊豆-小笠原、马里亚纳、汤加-克马德克、千叶等海沟; 分布在濒临干燥的大陆区, 也缺少沉积物来源的陆缘, 如智利边缘的中段和北段; 但海沟陆侧坡上部也发育能有效捕获沉积物的盆地, 如琉球海沟; 沉积物补给有限的边缘, 如中美海沟的危地马拉段.

(2) 俯冲增生过程与增生棱柱体. 传统上增生楔是指俯冲增生楔, 但如今也发现一种被动陆缘或转换型陆缘发育的增生楔, 如东非Lamu盆地(Cruciani等, 2017)、尼日尔三角洲、亚马逊三角洲(Morley等, 2011), 其变形机制是否与俯冲有关还有待确定. 不过, 它们的形成涉及近场应力驱动下或巨厚沉积物重力作用下的薄皮挤压逆冲拓展. 因此, 增生楔现今划分为三类: 近场应力驱动系统、远场应力驱动系统和远近应力场混合驱动系统(King和Morley, 2017). 它们的构造产物都是深水褶皱-逆冲带, 是油气系统或水合物的良好聚集场所. 本文海沟系统的增生楔是俯冲增生楔, 是远场应力驱动系统所致, 是海沟系统浅层的主要构造单元, 俯冲板片沿海沟受到刮削过程中增生而成. 最近, 围绕马尼拉海沟增生棱柱体、南沙海槽增生棱柱体的研究, 不仅揭示了其变形过程的分段性和地震-海啸效应、俯冲增生的递变性和油气圈闭系统的成藏性、超压流体系统与泥火山及相关冷泉效应, 还关注到了这个过程如何塑造海沟三维形态及其深时海流底层水变化、对现今深海海流的控制效应及海流对海沟

形态的修饰作用. 此外, 从全球视野去对比研究不同气候分带区域的俯冲增生系统, 揭示大气圈环境对源-汇过程、海沟系统沉积过程的制约, 有助于开拓流固耦合领域的新研究.

总之, 构造侵蚀和构造增生特征不同: 在马里亚纳岛弧海沟处, 没有深水沉积物的增生; 相当大体积的沉积物进入了俯冲隧道, 且进入海沟的太平洋板块上沉积物厚度约为0.5km; 40Myr内的俯冲速率是 10cm a^{-1} , 而弧前正经历构造侵蚀; 大部分的沉积物都被俯冲下去, 只有一小部分再循环进入岛弧火山. 沿着智利海沟边缘, 沉积物补给也不同, 北部的荒漠地区很少, 而南部降雨量高的地区则要大得多. 已有研究表明, 大陆基底在智利北部可能正在被侵蚀, 而在智利南部通过沉积增生很可能正在生长; 在沉积物补给程度高的地区, 沉积物可以填充海沟, 并溢出淹没大洋板块, 从而抑制板片, 以致其以一个浅的角度靠近俯冲带. 可见, 增生和侵蚀都与大气圈环境、海洋水文环境、俯冲板块原始构造要素组合等密切相关, 也是流固耦合、圈层耦合、深浅耦合、海陆耦合研究的一个良好切入点.

4 海沟系统关键科学问题与研究展望

正如上述所言, 研究海沟系统动力学演化过程的关键是如何突破不同过程的时间尺度与空间尺度差异, 即在不同时、空尺度下, 以地质、地球物理、地球化学证据为约束条件, 拟合出在地球深浅部(不同圈层间)的耦合作用下地貌动力学演化过程, 从而检验海沟系统模型的正确性. 而这个地球地表关键界面不仅是内外动力塑造的产物、多圈层相互作用的表征、流固耦合的关键界面, 还是资源和环境效应的载体.

4.1 海沟沉积建造与全球变化性记录

目前, 人们对海沟盆地或相关盆地的研究还非常薄弱. 虽然海沟沉积序列的保存潜力有限, 但海沟盆地内地层或沉积物记录了地球上物质、能量交换最激烈地带的方式、过程和机制, 且沉积厚度超过1km通常会形成增生楔(Busby和Azor, 2012). 特别是, 不同盆地、不同纬度的海沟段落的沉积地层厚度、沉积建造组成、古气候和古海洋等古环境信息记录、古海底滑坡等灾害事件记录都千差万别, 因而这不仅是全球变化性研究的重要对象, 而且可以全面地揭示地球系统

演变. 然而, 迄今为止IODP尚没有系统的专门针对海沟沉积的钻探计划实施, IODP352航次也只是针对马里亚纳海沟的前弧围绕俯冲起始问题开展了研究, IODP的314~316、319、322、326、332、333、338、348航次和IODP的365、358、380航次等也只是对南海海槽开展了古地震和发震机制研究钻探(2014~2024), 362航次针对苏门答腊地震带开展了钻探, 但钻探位置还不在海沟部位, 而是印度洋内印度板块的前隆部位. 这里的主要问题是目前技术还无法实现万米钻探能力. 中国大洋钻探船建造非常及时, 海沟钻探对多学科发展也非常必要, 且还有沉积记录的大量科学问题有待回答.

海沟被誉为“海洋的终极垃圾桶”(Peng等, 2020), 容纳了大量环境信息. 利用海水和沉积中同位素示踪剂或环境替代指标, 针对海沟沉积记录, 不仅可以了解深时时期的深层水和底层水盐度、密度、营养盐分布、深层水水龄、水团或颗粒态和溶解态物质平均滞留时间、水体交换时间和流通率等水体物理性质和深水沉积的物理过程, 也可以用来揭示邻区大陆大气环境、气候变化、火山喷发旋回、地震灾害事件、生物地球化学过程、海沟深处沉积输运过程、生物分布型式和丰度、元素不均一性等变化, 甚至可以揭示人类活动导致的有机颗粒、有机碳埋藏、微塑料、重金属颗粒沉积的沉积变化, 特别是海沟深层水和底层水流动过程如何影响沉积输运过程、生物地球化学过程等涉及多个学科交叉研究. 因此, 深渊沉积动力学研究(Turnewitsch等, 2014)和海沟沉积序列的科学钻探具有重要的科学意义.

海沟系统侵蚀或增生的海底边界层是深浅部过程、内外动力共同作用的关键界面, 因此, 海沟系统的地貌演变也被列为面向国家重大战略需求的基础科学问题, 与能源、灾害过程密切相关. 中国国家自然科学基金委员会(2017)的《板块构造与大陆动力学战略研究》也十分明确地提出: 要构建深部地球动力过程与浅部地表系统响应的关联, 以洋陆过渡带的海沟系统为纽带, 将大洋板块俯冲与大陆边缘动力学过程紧密结合; 同时, 要跨越时间尺度鸿沟, 构建千年尺度动力过程与百万年地质时间尺度的链接, 突破大气圈-水圈-岩石圈之间流体-固体耦合机制障碍. 因此, 要弥补这些缺失的关键环节, 最为重要的切入点就是海沟系统, 它是海陆-流固-深浅耦合的跨圈层、跨相态、跨时长

过程的综合产物,是多学科交叉综合研究大气圈-水圈-岩石圈之间相互作用的关键,被地理学、地质学和海洋科学三个一级学科同时视为重大前沿科学问题之一.

4.2 海沟系统的物质循环与资源环境效应

紧邻海沟系统的大陆边缘也是十分重要的资源聚集场所. 据统计,全世界80%的石油储量和70%的天然气储量均赋存在大陆边缘及其附近(蔡乾忠, 1999). 75%边缘海主要集中在西太平洋活动大陆边缘. 中生代以来,西太平洋活动大陆边缘沟-弧-盆体系成因根本上来自海沟系统,大陆边缘成盆、成藏、成烃过程表现出自西向东渐新的演化趋势(Suo等, 2014),因此,类似的基础科学问题逐步被高度重视. 而且,海沟系统的地震触发机制与预测始终是世界难题——全球80%的地震都集中在海斗深渊以及附近岛屿,全球8级以上的地震也多集中在这一系统内(Liu等, 2013). 为此,地震学家们在海斗深渊底部安置全海深海底地震仪,就能系统获取天然地震的大量波形信息,这些数据对研究海底地震诱发机制及解析俯冲带深层地幔结构构造尤为关键.

海沟系统是俯冲工厂原料的入口(金性春和于开平, 2003),也是大洋地幔、洋壳和沉积物俯冲过程中所伴随的化学变化的关键. 俯冲带内物质流和能量流的交换及其对汇聚板块边界、地幔深部过程也反馈到水圈及大气圈,构成闭环的俯冲再循环(subduction recycling). 进入俯冲带的大洋板片,其上覆的陆源和生物源沉积物,来自大陆、水圈和大气圈;俯冲洋壳本身则起源于地幔,其浅表组成包括可能遭受流体作用形成的水化、蚀变产物. 俯冲板片随着温压升高,释出水 and 挥发分,流体和气体部分回返水圈和大气圈,还有部分流体和沉积物可能进入火山弧下的岩浆源区,并作为火成岩组分回返大陆地壳(图3). 俯冲再循环过程中释出的水和挥发分对火山活动有着重要作用,所以物质的俯冲再循环过程研究有助于理解海沟系统的相关灾害致灾机制. 海沟系统的沉积物等作为俯冲工厂的输入原料,特别需要对不同纬度、不同分段的海沟系统输入原料的不同进行多学科综合调查和对比研究,以揭示俯冲系统的表层控制因素,才能有效揭示深部俯冲系统的差异机制及其各种效应.

另一方面,俯冲板片释出的元素和流体,不仅控制了海沟系统中热液系统、冷泉系统的分布和产物,而

且涉及低温热液矿床的形成过程. 俯冲带上盘往往产出富金银的热液矿床,太古代许多金矿床与此很类似. 海沟系统最浅部的水和碳通量则制约着天然气水合物的合成和分解,并营养着海底深部生物圈及弧前区渗出流体为食的化学异养微生物群落. 这一再循环过程也改造了俯冲板块和上覆板块,涉及地表和地球内部的所有圈层(金性春和于开平, 2003).

总之,作为俯冲工厂的浅部构成,海沟系统再循环释放的流体可影响海洋化学成分的收支平衡. 释出的CO₂等气体和微量元素对大气成分也会产生重要影响. 大洋板片在“俯冲工厂”中经加工改造后,继续下潜至地幔深处,甚至抵达核幔边界,并且部分可能通过深部循环混合进入上涌的地幔底辟中;俯冲板片连同残存的挥发分及放射性生热元素会改变地幔的流变性质、氧逸度,并对对流造成深刻影响,进而影响火山喷发产物及海沟系统沉积建造类型.

俯冲再循环驱使地球表层和深部之间发生大规模物质交换作用. 海沟系统是地球上大气圈、水圈、岩石圈、生物圈、冰冻圈乃至下地幔之间多圈层相互作用的最活跃场所,是这些圈层之间物质与能量交换的纽带. 当前,海沟系统研究特别关注板块驱动力及欧亚板块“俯冲黑洞”形成机理、深碳循环、深渊环境下的极端生命或暗生命过程等重大前沿科学问题,应充分利用“蛟龙号”“奋斗者号”载人深潜器、ROV、AUV等海底平台对西太平洋-南海-印度洋的“两洋一海”重点海沟进行系统全面考察,力争在上述前沿科学问题取得原始创新. 同时,应着力中国大洋钻探船平台建成前,做好海沟系统钻探选址的多学科调查和规划,实现深海与深地科学的协同发展,寻求地球科学与生命科学前沿关键问题的重大突破口.

4.3 海沟系统的表层环境与生命起源

海斗深渊毫无疑问是地球系统一处海底极端环境,也是从极端条件下的科学视角多学科交叉研究地球系统的梦寐以求的绝佳研究对象. 深渊海沟是海洋的最深处,具“低温高压”“半封闭性”和地貌的“漏斗效应”等特点,是沉积物的天然辐聚区和微生物活动的活跃区,蕴育着丰富而特殊的生命形式. 过去受样品采集技术限制,对深渊生命过程缺乏系统了解,故难以有效开发利用深渊生物资源.

最近, Liu等(2019)通过自主研发的深海采水器获

得了马里亚纳海沟多个水层(0~10500m)的大体积海水样本,首次发现烃类降解菌在深渊千米水体出现勃发,它们具有完整的烷烃降解通路,能在低温高压条件下有效降解烷烃。这是首次在自然生境中发现“吃油”微生物的富集,其优势类群显著区别于石油污染生境。该研究指出烷烃可能是千米水体微生物的重要“燃料”。

深渊海沟孕育了极其特殊的异养型微生物群落,与深海浅层差异显著。深渊海沟展现出活跃的微生物异养代谢,是海洋有机质转化的关键环节,是形成海洋碳存储的重要制约因素。深海以惰性有机质为主要有机质组分,往往难以被微生物分解利用,而海沟中进行的微生物驱动的有机质矿化作用,表明海沟微生物演化出了特殊的代谢机制,可作为探索发现生命代谢新途径的重要窗口。异养微生物在海沟深处的勃发同时促进了捕食者的繁殖,形成了完整的微食物环,在碳循环中发挥重要作用。然而,以往受深海观测采样技术的限制,对海沟微生物生命过程及能量流动的认知高度匮乏。因此,探究海沟微生物的有机质降解速率、利用模式及能量归趋,有助于发现有机体物质代谢新模式,有必要深化对深海惰性有机质降解过程的理解,揭示海沟碳循环的微生物驱动机制,评估海沟对全球海洋碳收支平衡的贡献。此外,海沟微生物特殊的代谢机制也记录了生命的长久进化历程,成为研究生命随地质历史和环境条件演变过程的重要抓手。海沟微生物在进化的历史长河中,可能形成特殊的代谢依赖性和互作模式,对维持海沟生态系统至关重要。对不同海沟段微生物相互作用关系的探究有助于深入理解海沟微生物的多样性及其维持机制,进一步深化对海沟生命过程的认知。

获取深渊海水、沉积物和多细胞生物样品依然是未来研究的保障。已有的或新获取样品的多技术培养、微生物菌株资源规模化获取、微生物新物种鉴定,有助于建立深渊生物物种资源库。深渊功能微生物、深渊多细胞生物的基因组和典型深渊沉积物/水体样品的宏基因组的测序和注释,也必将充实和完善深渊生物基因资源库,形成高效的深渊生物资源获取技术及信息资源库建设体系。多组学、微生物培养、同位素示踪及分子遗传学等技术手段的发展则有助于分析深渊海水及沉积物中微生物的群落结构、代谢活性及演替机制,进而探究深渊微生物驱动碳-氮-硫-铁

耦合循环的机制,揭示其生态效应。典型深渊微生物和多细胞生物的生理代谢特征、关键基因的功能和调控探究则可阐明其高压、低温适应机制,揭示深渊多细胞生物与微生物以及病毒与宿主的互作及协同机制。为此,有必要从深渊生物基因组和宏基因组中筛选新型酶基因及次级代谢产物合成基因簇,对其进行激活、高效表达及产物性质研究,发掘新型生物活性物质,评估其应用潜力并初步形成评价和技术开发体系。

因此,展望未来海沟系统生命科学研究,其主要科学目标是:(1)认识深渊生物多样性演替规律,揭示其代谢互作机制、生命特征、环境适应机制及生态效应,丰富人类对“深部生物圈”的理解和对深渊生命科学的认知;(2)获得具有潜在研发价值的深渊生物及基因资源,建立深渊特色的物种和基因资源库,形成其应用潜力评价和开发技术体系,为深渊生物资源的持续开发和共享利用奠定扎实基础,同时为满足人类对深海生物资源的重大需求做出贡献。

4.4 海沟系统跨圈层过程与宜居地球

海沟系统作为地球系统的重要组成部分之一,垂向上划分,主体包括两部分:表层沉积动力过程和洋底动力过程。在海沟沉积物质来源上包括两个部分,一是上覆板块地壳风化,二是下沉板块表层地壳刮削。在沉积环境上也有静态与动态之分,特别是增生楔的生长记录了汇聚板块发展的历史。这些过程同等重要,共同塑造着这个蓝色宜居星球。为了未来多学科交叉、更精深认知地球系统,有必要选择海沟系统作为切入点,关注现今地球表层动力系统研究的同时,还需要针对古代海沟系统的综合对比研究,在区分静态与动态海沟沉积物的基础上,侧重突破对深时地球系统运行起关键作用的固体地球系统动力学问题。

宜居地球深时演化的很多信息保存在海沟系统中。海沟盆地、海沟斜坡盆地和弧前盆地是沉积储库,也是下沉和上覆板块地表环境与过程的信息库,同时又是深海物理、化学、生物环境的资料库。因此,无论是古代海沟系统还是现代海沟系统都具有重要的研究价值。特别是一些古代海沟系统遭到后期改造后,可以采用将今论古的法则,利用现代海沟系统的过程辅助甄别古代海沟系统的多解性,需要区分碎屑物质是上覆板块地壳风化来源还是俯冲板块地壳刮削来源。例如,马里亚纳洋内弧岩浆岩中发现的800Ma继承锆

石,可能是50Ma左右东西走向的马里亚纳海沟在垂直东亚(更可能是华南)大陆边缘时,沿海沟轴向水道的重力流(浊流、碎屑流)等将华南陆块地壳的碎屑沉积物搬运到深海沟后,在后期马里亚纳海沟旋转为南北走向的过程中,发生深俯冲后再遭熔融并进入了岛弧岩石中.这完全是经一个地表循环过程直接进入俯冲系统的途径,而非洋中脊辉长岩中大量古老锆石的那种经过长期深部地幔循环途径.类似的还有洋内弧环境的阿留申海沟,该海沟发育现代海底扇,其物源源自远距离的北美大陆.可见,现代海沟系统源-汇过程非常复杂,在纵向与横向两个维度物质迁移显著.

海沟表层过程与深部俯冲动力过程有机结合,是海沟系统动力学的核心研究内容.从平面上划分,海底地球系统又可以划分为俯冲消减系统、洋脊增生系统、转换构造系统和深海盆地系统.而海沟系统不仅关联海底地球系统,还涉及相关的海流系统、大气系统、极端生态系统等,垂向上同样可以划分为表层沉积动力学和固体圈层动力学次级系统.海沟不仅是洋陆过渡带的重要单元,联系海陆;而且是源-汇效应的核心地带,是浅表物质循环的物质汇,但又是深部物质循环的源;同时,它还是岩石圈和水圈的关键界面,是多个学科的共同研究对象.海沟系统是很多地质过程的关键所在,因此,不能孤立研究,应当以地球系统科学的理念耦合分析.

宜居地球区别于其他非宜居行星的重要一点就是长期存在独特的俯冲系统.海沟系统作为其浅表响应,无疑是宜居地球的一个关键研究对象.例如,海沟系统是沟通地球深部碳循环和地球表层碳循环的关键纽带,海沟系统响应俯冲过程的放大效应,使人类感受到全球变化的强大威力;海沟系统大地震灾害频发,对人类生存环境也构成巨大威胁.仅从这两个方面看,海沟系统已经深刻影响着人类对地球的宜居感.

然而,迄今为止,对海沟系统行为的预测能力还远远不能满足管控地球的人类需求,无论是层序地层学、古海洋学、古气候学还是地球系统科学都依然处于对地球表层系统的定性描述或半定量阶段,甚至还停留在理念思考上,没有真正实现对状态、过程和动力的定量描述、模拟、分析与预测,这其中的原因或缺陷就是自然科学的分科研究.如今,国内外都开始注意到这些缺陷,积极构建有机关联这些圈层间相互作用的新技术,在高速发展的计算机技术和计算方法

发展的基础上,大力开发相关模拟软件.因此,依托这些强大的软、硬件工具,当今海沟系统研究趋向于地幔或软流圈、水圈、大气圈和生物圈之间相互作用和耦合过程和机理的集成综合研究,有望建立跨海陆、跨圈层、跨相态、跨时长的动态多物理量非线性约束下的复杂海沟系统动力学技术、方法与理论体系.

5 国际深海沟研究的未来挑战

5.1 深海沟技术新挑战

海斗深渊的巨大深水压力是人们探索地球上最深海底的首道障碍,所以迄今海斗深渊科学及技术的未来发展仍然属于尚待开辟的领域和战线.国际海洋高科技竞争的焦点就在于研发支撑海沟系统科学研究的系列抗压探测装备技术,包括适应大深度的着陆器、传感器、特种材料、水下自治机器人、水下遥控机器人、水下滑翔机、载人潜水器、物联网、区块链、智能感知系统等技术,这涉及多个深海高技术领域,如防腐材料、能源保障、精密导航、实时通讯、智能控制、自主巡航、无人运载、自动作业、人工智能等.

5.2 国际海沟系统科学内涵的新探索

正如前文所述,针对海斗深渊的科学研究,已有多个国家先后启动了大科学计划,如日本和英国联合资助的HADEEP计划(2006~2011)、美国自然科学基金委员会支持的HADES计划(2012~2015)、中国海洋大学的“万米深海行动计划”、中国科学院的“海斗深渊前沿科技问题研究与攻关”战略性先导科技专项(B类)项目等.但这些计划并没有明确的科学目标,主要是以各种调查和探测技术的试验为目的,依然是实现“能够到达”的上天、入地、下海、登极的“下海”层面,没达到“深度认知”的深海、深地、深空、深蓝的“深海”层面.为此,需要开展多学科集成的大科学目标,激发全球研发能力,集中全球专家智慧,至少从地质学角度形成一个国际性大科学计划——国际海沟计划(Inter-Trench).

中国应在西太平洋海沟系统研究已取得一定积累的基础上,着力融合更多学科科学家参与海沟系统调查和研究,利用国内优势,吸引更多国外科学家的参与,及时提出“国际海沟计划”倡议,逐渐形成中国科学家主导的国际大科学计划——国际海沟计划.围绕

生命、环境、资源、灾害和循环的主题, 全面开展以下研究: (1) 满足科学目标的全海深智能型探测系统研发; (2) 深渊生态系统与生命过程及药用功能基因发现; (3) 海沟系统流体与跨圈层物质能量循环; (4) 深渊海洋流系与地表环境演变; (5) 有机和无机地球化学循环与全球变化; (6) 俯冲动力过程与海沟地质过程; (7) 海沟系统动力过程与资源灾害效应; (8) 全球板块重建与深时海沟演变。

致谢 非常感谢主编郑永飞院士和9位匿名审稿人的仔细审稿和建设性建议, 使得本文内容更为集中。

参考文献

- 蔡乾忠. 1999. 我国海洋油气勘探开发取得突破性进展(1997~1998年). 海洋地质动态, (3): 1-10
- 郭令智. 1986. 大陆边缘地质学研究的新动向. 地球, 2: 2
- 金性春, 于开平. 2003. 俯冲工厂和大陆物质的俯冲再循环研究. 地球科学进展, 18: 737-744
- 李家彪. 2005. 中国边缘海形成演化与资源效应. 北京: 海洋出版社. 1-509
- 李家彪. 2008. 东海区域地质. 北京: 海洋出版社. 452
- 乔璐璐, 王震, 刘世东, 李广雪, 刘雪, 黄玲玲, 薛文静, 仲毅. 2017. 从陆架海到西太平洋: 黄、东海悬浮体跨陆架输运通道与机制. 地学前缘, 24: 134-140
- 上田诚也, 杉村新. 1979. 岛弧. 北京: 地质出版社. 1-190
- 王倩. 2018. 新特提斯构造域东段弯山构造的形成与演化. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学. 1-147
- 徐茂泉, 陈友飞. 1999. 海洋地质学. 厦门: 厦门大学出版社. 164
- 徐义刚, 李洪颜, 洪路兵, 马亮, 马强, 孙明道. 2018. 东亚大地幔楔与中国东部新生代板内玄武岩成因. 中国科学: 地球科学, 48: 825-843
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379-414
- 中国国家自然科学基金委员会. 2017. 板块构造与大陆动力学战略研究. 北京: 科学出版社. 1-470
- Baker E T, Feely R A, De Ronde C E J, Massoth G J, Wright I C. 2003. Submarine hydrothermal venting on the southern Kermadec volcanic arc front (offshore New Zealand): Location and extent of particle plume signatures. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 219: 141-161
- Boillot G. 1979. *Geology of Continental Margins*. Washington D C: The National Academic Press. 115
- Bowen A D, Yoerger D R, Taylor C. 2009. Field trials of the Nereus hybrid underwater robotic vehicle in the Challenger Deep of the Mariana Trench. Biloxi: OCEANS'09, IEEE/MTS Conference Proceedings
- Busby C, Azor P A. 2012. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd. 1-735
- Clift P, Vannucchi P. 2004. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust. *Rev Geophys*, 42: RG2001
- Cruciani F, Barchi M R, Koyi H A, Porreca M. 2017. Kinematic evolution of a regional-scale gravity-driven deepwater fold-and-thrust belt: The Lamu Basin case-history (East Africa). *Tectonophysics*, 712-713: 30-44
- Dai L M, Wang L L, Lou D, Li Z H, Dong H, Ma F F, Li F K, Li S Z, Yu S Y. 2020. Slab rollback versus delamination: Contrasting fates of flat-slab subduction and implications for South China evolution in the Mesozoic. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e19164
- Dasgupta R, Mandal N. 2018. Surface topography of the overriding plates in bi-vergent subduction systems: A mechanical model. *Tectonophysics*, 746: 280-295
- de Ronde C E J, Sibson R H, Bray C J, Faure K. 2001. Fluid chemistry of veining associated with an ancient microearthquake swarm, Benmore Dam, New Zealand. *Geol Soc Am Bull*, 113: 1010-1024
- Eloe E A, Malfatti F, Gutierrez J, Hardy K, Schmidt W E, Pogliano K, Pogliano J, Azam F, Bartlett D H. 2011. Isolation and characterization of a psychropiezophilic alphaproteobacterium. *Appl Environ Microbiol*, 77: 8145-8153
- German C R, Livermore R A, Baker E T, Bruguier N I, Connelly D P, Cunningham A P, Morris P, Rouse I P, Statham P J, Tyler P A. 2000. Hydrothermal plumes above the East Scotia Ridge: An isolated high-latitude back-arc spreading centre. *Earth Planet Sci Lett*, 184: 241-250
- Hu D X, Wu L X, Cai W J, Gupta A S, Ganachaud A, Qiu B, Gordon A L, Lin X P, Chen Z H, Hu S J, Wang G J, Wang Q Y, Sprintall J, Qu T D, Kashino Y, Wang F, Kessler W S. 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate. *Nature*, 522: 299-308
- Iizasa K, Fiske R S, Ishizuka O, Yuasa M, Hashimoto J, Ishibashi J, Naka J, Horii Y, Fujiwara Y, Imai A, Koyama S. 1999. A kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera. *Science*, 283: 975-977
- Ishibashi J I, Urabe T. 1995. Hydrothermal activity related to arc-backarc magmatism in the Western Pacific. In: Taylor B, ed. *Backarc Basins*. Boston: Springer. 451-495
- Jamieson A. 2015. *The Hadal Zone: Life in the Deepest Oceans*. Cambridge: Cambridge University Press. 1-371
- Jamieson A J, Fujii T, Mayor D J, Solan M, Priede I G. 2010. Hadal trenches: The ecology of the deepest places on Earth. *Trends Ecol Evol*, 25: 190-197
- Jamieson A J, Lacey N C, Lörz A N, Rowden A A, Piertney S B. 2013. The supergiant amphipod *Alicella gigantea* (Crustacea: Alicellidae)

- from hadal depths in the Kermadec Trench, SW Pacific Ocean. *Deep Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 92: 107–113
- Keary P, Vine F J. 1990. *Global Tectonics*. Oxford: Blackwell Science. 178
- King R C, Morley C K. 2017. Wedge geometry and detachment strength in deepwater fold-thrust belts. *Earth-Sci Rev*, 165: 268–279
- Kobayashi H, Hatada Y, Tsubouchi T, Nagahama T, Takami H. 2012. The hadal amphipod *Hirondellea gigas* possessing a unique cellulase for digesting wooden debris buried in the deepest seafloor. *PLoS One*, 7: e42727
- Lallemand S. 1999. *La Subduction Oceanique*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 108
- Lemche H, Hansen B, Madsen F J, Tendal O S, Wolff T. 1976. Hadal life as analysed from photographs. *Videnskabelige Meddelelser Fra Dansk Naturhistorik Forening*, 139: 263–336
- Li G X L P, Liu Y, Qiao L L, Ma Y Y, Xu J S, Yang Z G. 2014. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum. *Earth-Sci Rev*, 139: 390–405
- Li S Z, Suo Y H, Li X Y, Liu B, Dai L M, Wang G Z, Zhou J, Li Y, Liu Y M, Cao X Z, Somerville I, Mu D L, Zhao S J, Liu J P, Meng F, Zhen L B, Zhao L T, Zhu J J, Yu S Y, Liu Y J, Zhang G W. 2018. Microplate tectonics: New insights from micro-blocks in the global oceans, continental margins and deep mantle. *Earth-Sci Rev*, 185: 1029–1064
- Li S Z, Suo Y H, Li X Y, Zhou J, M. S, Wang P C, Wang G Z, Guo L L, Yu S Y, Lan H Y, Dai L M, Zhou Z Z, Cao X Z, Zhu J J, Liu B, Jiang S H, Wang G, Zhang G W. 2019. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Earth-Sci Rev*, 192: 91–137
- Li S Z, Zhao G C, Dai L M, Zhou L H, Liu X, Suo Y H, Santosh M. 2012. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 47: 80–93
- Liu J W, Zheng Y F, Lin H Y, Wang X C, Li M, Liu Y, Yu M, Zhao M X, Pedentchouk N, Lea-Smith D J, Todd J D, Magill C R, Zhang W J, Zhou S, Song D L, Zhong H H, Xin Y, Yu M, Tian J W, Zhang X H. 2019. Proliferation of hydrocarbon-degrading microbes at the bottom of the Mariana Trench. *Microbiome*, 7: 47–60
- Liu S D, Qiao L L, Li G X, Li J C, Wang N, Yang J C. 2015. Distribution and cross-front transport of suspended particulate matter over the inner shelf of the East China Sea. *Cont Shelf Res*, 107: 92–102
- Liu S D, Qiao L L, Li G X, Shi J H, Huang L L, Yao Z G, Gao F, Wang Z, Min J X. 2018. Variation in the current shear front and its potential effect on sediment transport over the inner shelf of the East China Sea in winter. *J Geophys Res-Oceans*, 123: 8264–8283
- Liu S F, Gurnis M, Ma P F, Zhang B. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma. *Earth-Sci Rev*, 175: 114–142
- Liu X, Zhao D P, Li S Z. 2013. Seismic imaging of the Southwest Japan arc from the Nankai trough to the Japan Sea. *Phys Earth Planet Inter*, 216: 59–73
- Liudmila V D, Wang P C, Li S Z, Cao X Z, Somerville I, Zhou Z Z, Hu M Y, Suo Y H, Guo L L, Wang Y M, Li X Y, Liu X, Yu S Y, Zhu J J. 2018. Meso-Cenozoic evolution of earth surface system under the East Asian tectonic superconvergence. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 92: 814–849
- Ma P F, Liu S F, Gurnis M, Zhang B. 2019. Slab horizontal subduction and slab tearing beneath East Asia. *Geophys Res Lett*, 46: 5161–5169
- Martin A K. 2007. Gondwana breakup via double-saloon-door rifting and seafloor spreading in a backarc basin during subduction rollback. *Tectonophysics*, 445: 245–272
- Maruyama S, Hasegawa A, Santosh M, Kogiso T, Omori S, Nakamura H, Kawai K, Zhao D. 2009. The dynamics of big mantle wedge, magma factory, and metamorphic-metasomatic factory in subduction zones. *Gondwana Res*, 16: 414–430
- Mason W G, Moresi L, Betts P G, Miller M S. 2010. Three-dimensional numerical models of the influence of a buoyant oceanic plateau on subduction zones. *Tectonophysics*, 483: 71–79
- Massoth G J, De Ronde C E J, Lupton J E, Feely R A, Baker E T, Lebon G T, Maenner S M. 2003. Chemically rich and diverse submarine hydrothermal plumes of the southern Kermadec volcanic arc (New Zealand). *Geol Soc Lond Spec Publ*, 219: 119–139
- Morley C K, King R, Hillis R, Tingay M, Backe G. 2011. Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: A review. *Earth-Sci Rev*, 104: 41–91
- Müller R D, Flament N, Matthews K J, Williams S E, Gurnis M. 2016. Formation of Australian continental margin highlands driven by plate-mantle interaction. *Earth Planet Sci Lett*, 441: 60–70
- Nunoura T, Hirai M, Yoshida-Takashima Y, Nishizawa M, Kawagucci S, Yokokawa T, Miyazaki J, Koide O, Makita H, Takaki Y, Sunamura M, Takai K. 2016. Distribution and niche separation of planktonic microbial communities in the water columns from the surface to the hadal waters of the Japan Trench under the Eutrophic Ocean. *Front Microbiol*, 7: 1261
- Nunoura T, Takaki Y, Hirai M, Shimamura S, Makabe A, Koide O, Kikuchi T, Miyazaki J, Koba K, Yoshida N, Sunamura M, Takai K. 2015. Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: E1230–E1236
- Peng G Y, Bellerby R, Zhang F, Sun X R, Li D J. 2020. The ocean's ultimate trashcan: Hadal trenches as major depositories for plastic

- pollution. *Water Res*, 168: 115121
- Piccard J, Dietz R S. 1961. *Seven Miles Down*. London: Longman
- Qiao L L, Liu S D, Xue W J, Liu P, Hu R J, Sun H F, Zhong Y. 2020. Spatiotemporal variations in suspended sediments over the inner shelf of the East China Sea with the effect of oceanic fronts. *Estuar Coast Shelf Sci*, 234: 106600
- Saunders A D, Tarney J. 1984. Geochemical characteristics of basaltic volcanism within back-arc basins. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 16: 59–76
- Schellart W P, Stegman D R, Freeman J. 2008. Global trench migration velocities and slab migration induced upper mantle volume fluxes: Constraints to find an Earth reference frame based on minimizing viscous dissipation. *Earth-Sci Rev*, 88: 118–144
- Shikazono N. 2003. Geochemical and Tectonic Evolution of Arc-Backarc Hydrothermal Systems—Implication for the Origin of Kuroko and Epithermal Vein-Type Mineralizations and the Global Geochemical Cycle. Amsterdam: Elsevier Science. 1–463
- Stern R J. 2002. Subduction zones. *Rev Geophys*, 40: 1012
- Suo Y H, Li S Z, Jin C, Zhang Y, Zhou J, Li X Y, Wang P C, Liu Z, Wang X Y, Somerville I. 2019. Eastward tectonic migration and transition of the Jurassic-Cretaceous Andean-type continental margin along Southeast China. *Earth-Sci Rev*, 196: 102884
- Suo Y H, Li S Z, Yu S, Somerville I, Liu X, Zhao S J, Dai L M. 2014. Cenozoic tectonic jumping and implications for hydrocarbon accumulation in basins in the East Asia Continental Margin. *J Asian Earth Sci*, 88: 28–40
- Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, Somerville I D, Yu S, Dai L M, Xu L Q, Cao X Z, Wang P C. 2015. Continental margin basins in East Asia: Tectonic implications of the Meso-Cenozoic East China Sea pull-apart basins. *Geol J*, 50: 139–156
- Tao J L, Dai L M, Lou D L Z H, Zhou S H, Liu Z, Li S Z, Dong H, Lan H Y, Wang L L, Li F K. 2020. Accretion of oceanic plateaus at continental margins: Numerical modeling. *Gondwana Res*, 81: 390–402
- The MARGINS Office. 2004. MARGINS Program-Science Plans. New York: Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University. 1–170
- The MARGINS Office. 2010. GeoPRISMS-Draft Science Plan. New York: Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University. 1–140
- Turnewitsch R, Falahat S, Stehlikova J, Oguri K, Glud R N, Middelboe M, Kitazato H, Wenzhöfer F, Ando K, Fujio S, Yanagimoto D. 2014. Recent sediment dynamics in hadal trenches: Evidence for the influence of higher-frequency (tidal, near-inertial) fluid dynamics. *Deep Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 90: 125–138
- Uyeda S, Kanamori H. 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *J Geophys Res*, 84: 1049–1061
- von Huene R, Scholl D W. 1991. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Rev Geophys*, 29: 279–316
- Wagner M, Abdel-Mageed W M, Ebel R, Bull A T, Goodfellow M, Fiedler H P, Jaspars M. 2014. Dermacozines H-J Isolated from a Deep-Sea Strain of *Dermacoccus abyssi* from Mariana Trench Sediments. *J Nat Prod*, 77: 416–420
- Wang H J, Saito Y, Zhang Y, Bi N S, Sun X X, Yang Z S. 2011. Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia. *Earth-Sci Rev*, 108: 80–100
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman. 1–122
- Wu H. 2015. Cross-shelf penetrating fronts: A response of buoyant coastal water to ambient pycnocline undulation. *J Geophys Res-Oceans*, 120: 5101–5119
- Wu T N, Wu H. 2018. Tidal mixing sustains a bottom-trapped river plume and buoyant coastal current on an energetic continental shelf. *J Geophys Res-Oceans*, 123: 8026–8051
- Yancey P H, Gerringer M E, Drazen J C, Rowden A A, Jamieson A J. 2014. Marine fish are biochemically constrained from inhabiting deepest ocean depths. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 4461–4465
- Yoshida H, Ishibashi S, Watanabe Y. 2009. The ABISMO mud and water sampling ROV for surveys at 10,000 m depth. *Mar Technol Soc J*, 43: 87–96
- Zhang B, Li G X, Li S Z, Dada O A. 2016. Docking and subduction of the West Pacific seamounts along the Mariana Trench and their effects. *Geol J*, 51: 579–592
- Zhang Y, Li S Z, Suo Y H, Guo L L, Yu S, Somerville I, Guo R H, Zang Y B, Zheng Q L, Mu D L. 2016. Origin of transform faults in back-arc basins: Examples from Western Pacific marginal seas. *Geol J*, 51: 490–512
- Zhang X, Li L F, Du Z F, Hao X L, Cao L, Luan Z D, Wang B, Xi S C, Lian C, Yan J, Sun W D. 2020. Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system. *Sci Bull*, 65: 958–964
- Zheng Y F. 2019. Subduction zone geochemistry. *Geosci Front*, 10: 1223–1254
- Zheng Y F, Zhao Z F. 2017. Introduction to the structures and processes of subduction zones. *J Asian Earth Sci*, 145: 1–15

(责任编辑: 郑永飞)