

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.04.001

西太平洋—北印度洋及其洋陆过渡带:古今演变与论争

张国伟^{1,2,3}, 李三忠^{2,3}

(1. 西北大学地质学系, 西安 710069; 2. 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;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质功能实验室, 青岛 266237)

摘要:西太平洋-北印度洋及其洋陆过渡带是国家发展战略“一带一路”的海洋丝绸之路核心区,从地球科学的视野,科学地深度思考认知“一带一路”相关的地质基本问题,尤其相关两洋及其洋陆过渡带的地质与海洋的科学基本问题及其自然生态环境、灾害、资源能源状态、潜力、发展趋势,是当前地球科学界服务于国家重大需求的重要任务。因此,本文主要就西太平洋和北印度洋及其洋陆过渡带的相关固体海底科学的几个重要问题进行讨论:1、现代有关两洋突出的大洋地质问题。从两洋及其洋陆过渡带研究现状与发展需求思考,主要包括,(1)两洋及其板块的起源、起始与消演化问题,主要有,①初始三角型太平洋域板块起源、过程,包含 Galapagos 和西 Shatsky 等微板块差异成因等;②古今太平洋域的诸板块对东亚大陆作用时空演化过程和现今状态与趋势;③印度洋起始、演化与超大陆裂聚问题。(2)洋中脊研究最新进展与问题:①洋中脊-热点相互作用和洋中脊增生方式问题,如何思考洋中脊 0 Ma 处的千万年垂向增生行为与百万年侧向扩张关系问题;②弧后盆地扩张与正常大洋洋中脊的成因机制差异;③印度洋超慢速和太平洋快速扩张与差异扩张的根本动因,是否有主动与被动扩张之分,及其关于洋中脊推力问题等;④洋中脊跃迁死亡:洋内板块重建、洋中脊终止活动和空间跃迁的原因;⑤洋中脊-地幔柱相互作用。(3)洋内俯冲和洋内构造问题:①洋内俯冲带起因与洋内弧、洋中脊俯冲与陆缘板片窗、转换断层与转换型大陆边缘;②大火成岩省与海山链、洋底高原等。(4)印度洋洋核杂岩与洋壳流变学问题等。(5)大洋板块驱动力问题研究进展,包括地幔对流、负浮力、海沟吸引力、洋中脊推力等新的评述讨论。2、两洋的洋陆过渡带问题。包含:(1)陆缘基底属性:冲绳海槽、鄂霍茨克海、新西兰东侧海底地壳是陆壳还是洋壳及洋内微小陆块的成因和来源;(2)洋陆过渡带的洋陆交接转换与耦合过程如何:西太平洋海山链记录的洋内重大转折事件与大陆边缘重大事件对比、洋陆转换带与地幔剥露、弧后盆地转换断层成因、转换型陆缘的形成与消减等问题。(3)西太平洋与东亚大陆的洋陆过渡带有无巨大平移转换断裂作用,其时空、规模如何,意义何在。(4)两洋交接转换与洋陆过渡带深部关联,即欧亚、太平洋和印度-澳大利亚三大板块汇聚,及其从深层地幔、岩石圈到地壳与地表系统效应问题,及在此背景下两洋的洋陆过渡带相关问题。3、古今太平洋板块与特提斯带、欧亚大陆板块、印度洋域板块关系,尤其现今它们的关系及其发展动态趋势。最后对“两洋一带”有关海洋地质、洋陆过渡带与深部地质作了瞻望。

关键词:洋陆过渡带;两洋交接转换;洋底动力学;一带一路;印度洋;西太平洋

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)04-0001-17

西太平洋-北印度洋海域及洋陆过渡带(以下简称“两洋一带”)是“一带一路”战略的核心区域(图 1),并辐射全球。其地理范围包括了海上丝绸之路的海域和洋陆过渡带,涉及 60 多个国家。中国倡导的“一带一路”,目的为使沿线国家紧密成为利益、命运和责任共同体,促使人类社会可持续和平稳发展,因此,世界多国的一带一路的社会融合的交流合作

发展需要国际合作的大科学支撑,中国作为倡导国家,不失时机地牵引实施相应的国际大科学计划,凝聚各国优秀科学家为“一带一路”战略发展,共同为海上丝绸之路区域相关重大基本重要地学问题,开展国际合作研究,已是不可或缺的紧迫重要任务。因此及时提出与讨论海上丝绸之路的区域两洋及其洋陆过渡带地学关键科学问题与研究,无疑已是很必要和重要的。

大洋和大陆是天体地球外壳岩石圈与地壳的两个基本组成与结构构造单元,两者相伴而生,互为转化,密不可分,相同相似而又差异不同,研究认识洋和陆,是揭示认知整体地球的最直接基本内容、对象。研究认识洋陆及其关系,除分别从大陆和海洋本身探索研究外,最直接是对洋陆两者的交接转换

基金项目:国家自然科学基金(41325009, U1606401);山东省泰山学者特聘教授项目;鳌山卓越科学家计划(2015ASTP-0S10);国家海洋局重大专项(GASI-GEOGE-01)

作者简介:张国伟(1939—),男,中国科学院院士,地质学专业, E-mail: gwzhang@nwwu.edu.cn

通讯作者:李三忠(1968—),男,博士生导师,构造地质与海洋地质专业, E-mail: sanzhang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017-05-31; **改回日期:** 2017-06-19. 周立君编辑

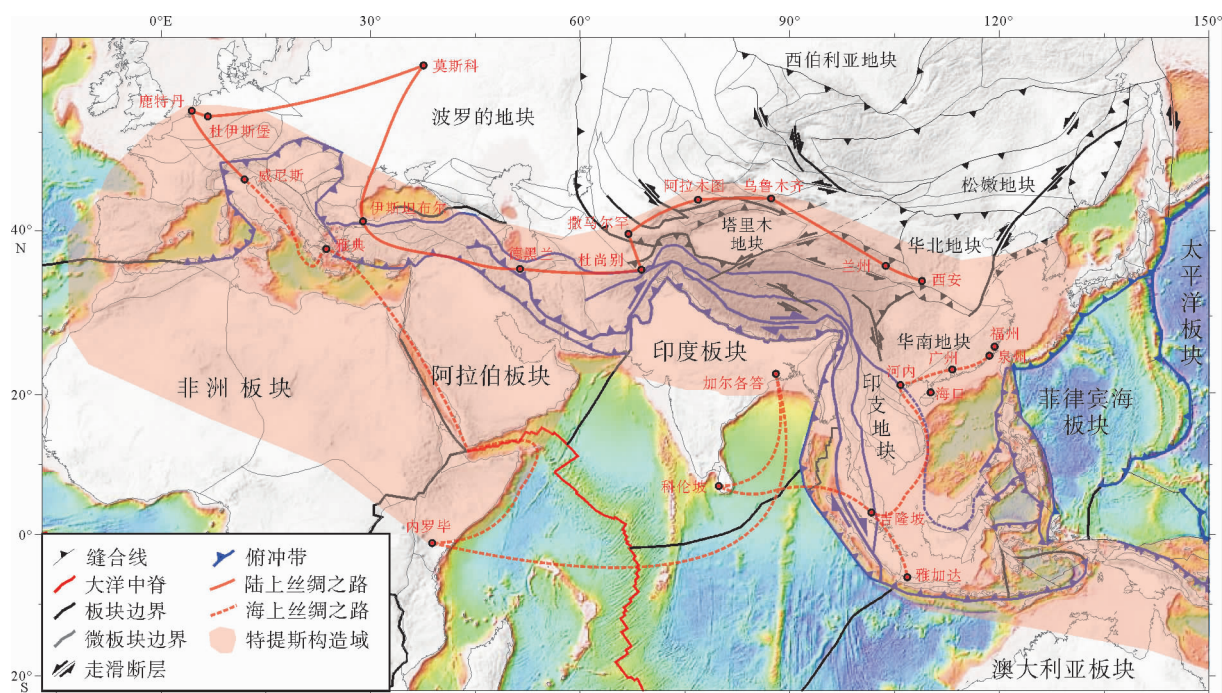


图1 “一带一路”构造-地貌格局

Fig. 1 Tectonic map along the Belt and Road

过渡带的研究,不研究认识大陆就不能完全认知大洋,同样不研究大洋也就认识不了大陆,而且很关键在地球上部的洋陆过渡带,从表层洋壳(包括流体海水)、陆壳到深部大洋地幔和大陆地幔纵横时空四维的综合系统深入研究,才能进一步真正揭示认知洋陆关系和地球外壳洋陆两大基本组成单元,才能一步步接近走向认识宇宙天体地球从内核到外层空间的整体实质内涵及面貌。所以洋陆过渡带研究对于大陆与大洋的研究显然很重要。而且其中西太平洋和北印度洋及其洋陆过渡带,又是全球最复杂最具典型代表性和富有独特特色的研究区域。因之,选择研究两洋及其洋陆过渡带是理所应该的,更何况这里就包含着我们的领土、领海、疆界,就在家门口,是走向远洋深海、走向世界的必经通道,走向海洋强国、振兴中华,与世界各国合作交流,促进人类和平繁荣和科学发展的战略要地和要道!

西太平洋与北印度洋及其洋陆过渡带,如上述,即是“一带一路”的海上丝绸之路,简称两洋一带,不仅是人类起源、迁徙、繁育、集散、冲突、古代文明与兴衰的重要核心地区,至今也是世界发展、争夺的政治、经济、军事、人文的焦点地区,同时也是当今世界人-地关系发展普遍关注的突出焦点地区。对于我国战略发展、政治经济强盛、科技发达、走向海洋强国,更是发展基地和通向世界的要道,位置重要而关键。对地球科学来说更为突出和重要的是,它是全

球地球科学重大问题集中聚焦的地区。两洋一带海上丝绸之路区域是中新生代以来现代全球板块构造体制下,地球三大板块,即欧亚、古今太平洋和印度-澳大利亚等三大全球性板块汇聚拼合之地,也是地球历史演变中南北古大陆及其之间特提斯带俯冲、碰撞、拼合与大洋分离消亡的全球超大陆长期聚散,从深部地幔到上层岩石圈、地壳与地表系统壳幔圈层持续强烈相互作用的剧烈活动地域,控制影响着全球构造与地表系统,造成该区域成为全球最广阔复杂的洋陆和洋-洋交接转换、相互作用过渡的独特地球构造域,并形成拥有了全球最大规模金属成矿带^[1-3]和全球油气最富集区带^[4-5],地表最大起伏、矗立着全球最高的地理第三极—青藏高原与珠穆朗玛峰,与全球最深、人称地理第四极的马里亚纳海沟形成鲜明对照,两者紧相邻,突出而特异,深刻蕴含着地质、海洋与地球动力学背景。同时,复杂的印太洋陆过渡带的地球表层系统也是地球大气-海洋系统能量激烈交换的场所,是地表沉积源-汇效应和壳幔深-浅部碳循环等的物质循环关键带,孕育了丰富的生物多样性,同时带来了频繁严重的自然灾害;洋陆岩石圈及水圈相互作用还诱发强烈地震、海啸、火山喷发、海底滑坡等毁灭性灾难。关键带的多尺度海洋-陆地相互作用使得海岸带人-地环境不断变迁乃至恶化,成为人类社会与科学关注的重点地区。

总之,西太平洋和北印度洋及其洋陆过渡带的

海上丝路区域地质从深部到浅层的组成、结构、演化和动力学及其效应等,给我们提出了诸多重要科学问题,诸如两洋及其洋陆过渡带迄今认知研究现状及其前缘亟待解决的关键核心问题,该区域洋陆跨圈层相互作用及其过程的规律问题,固体与流体海洋相互作用制约及其本质问题,两洋一带区域资源能源环境灾害问题,大洋板块根本驱动力源泉和各种效应问题,以及该区域总体发展动态趋势与人类社会可持续发展的作用等等。因此,从该区域整体认识大气-水体-海洋-陆地-岩石-地壳-地幔各种关系,尤其其纵横关键界面问题,成为认知地球系统过程与动力学的核心,但也是迄今研究的薄弱环节,因此,需要抓住关键科学问题,系统深入研究,重点突破。以往长期研究既有系列重要成果,但更多有迄今尚无解决而又关系区域和全球的一系列重大科学问题,目前“一路一带”战略的提出,更突出了这些重大问题研究解决的紧迫性与重要性。所以,本文从“两洋一带”洋陆过渡带和洋底动力学的固体海洋地质角度,由两洋重大地质问题、洋陆过渡带问题和全球性两大洋三大板块交接转换从深部地幔到上部地表系统汇聚相互作用及其效应三个学术方面思考,而以整体和相关动态演变的视角,从西太平洋及其洋陆过渡带、印度洋及其北部洋陆过渡带和两洋三板块交接转换与洋陆过渡带交叉叠合关系分别行文概论,简要阐述分析该区域洋陆固体地球的关键科学问题,以供大家思考讨论,促进深化研究。

1 西太平洋及其洋陆过渡带前沿科学问题

西太平洋洋陆过渡带(图2)构造上横跨欧亚板块、澳大利亚板块和太平洋板块,总体包括古今太平洋板块俯冲所波及的区域,西界大体为大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带,东界至马里亚纳俯冲带^[6],包括第二岛链以内的深海大洋区,区域内洋、陆、沟、弧、岛、盆错综复杂,交织组合,壮阔复杂宏伟,是地球上独具特色和魅力的大地构造域。不言而喻,西太平洋及其洋陆过渡带对于中国具有重大意义,它涉及我国东部和东南部大陆岛屿、海域的国土划界,是国土边界权益和军事安全要地,是我国成为海洋强国的基地和走向深海大洋的海域通道,也是我国人口密集、社会经济最发达区域和社会与经济活动重要场所、海陆兼备的地域,这里各类资源能源丰富,有待进一步开发利用,生态环境复杂演变,

有待研究并更好保护,这里也是我国与世界各国交往交流的重要场所,而今天又是海洋边境与国界争端的重要要冲、国家安全的军事前哨,其社会、政治、经济、军事重要意义,无疑重大!

同时已如前述,其对地球科学研究意义重大,而且在“两洋一带”中,西太平洋及其洋陆过渡带突出而独具特征,不仅对地学的各个学科意义重大,而且仅对固体地球科学来说,其前沿科学意义也十分重要突出。这里是世界最宽广、最复杂的欧亚板块与最古老的太平洋板块的洋陆过渡带,发生与呈现多样复杂的俯冲、碰撞、多重大小多样弧沟系、洋盆、边缘海盆,巨量陆缘沉积系统,剧烈的洋陆间壳幔作用,岩浆热液流体活动,极端条件下的生命与生态环境,以及多种属性的复杂结构构造与动力学过程,有多重岛链,最深海沟,复杂洋陆地表结构地貌,以及西太平洋是太平洋中最大的火山高原区、最大的海山岛链,最老深海地层时代保存区域,及其与特提斯和印度洋的交接转换的地表到深层的地球动力学作用等等。同时其地表系统更是一个独具特色的典型复杂区,可以是一个相对独自的科学大系统,这里是地球最高峰和最深海沟并存,短距离纵横剧烈变换起伏,这里是全球大气、大洋冷暖温盐传送带转换控制区,蕴含赋存着太平洋古海洋环境的核心科学问题信息。大气圈、水圈作为地球动力系统的重要组成部分,是与人类生存密切相关的地表系统主要构成部分,对其状态、过程和机制及其与地圈的广泛强大剧烈交互作用及效应,更需要开展深广综合的研究。无疑,西太平洋及其洋陆过渡带是重点解剖并力求突破的理想天然研究基地和实验场。总而言之,显而易见西太平洋及其洋陆过渡带具有世界地学的基本重大而迄今仍无解决的前沿基础与应用科学问题,亟待解决^[7],对该区开展研究探索解决,可以带动当代地球科学的发展,满足和适应国家和人类的重大需求。

基于已有研究和目前进展,简要综合概括以下几个关键问题,供讨论。

1.1 古今太平洋域板块起源、起始与演化

古今太平洋域板块起源、起始与演化中突出的问题是:从太平洋域中原三角形或多边形洋内微板块如何起源、起始,并发展到太平洋域各自不同板块对东亚大陆边缘的作用、洋陆交接转换到统一洋陆过渡带发展演化过程。

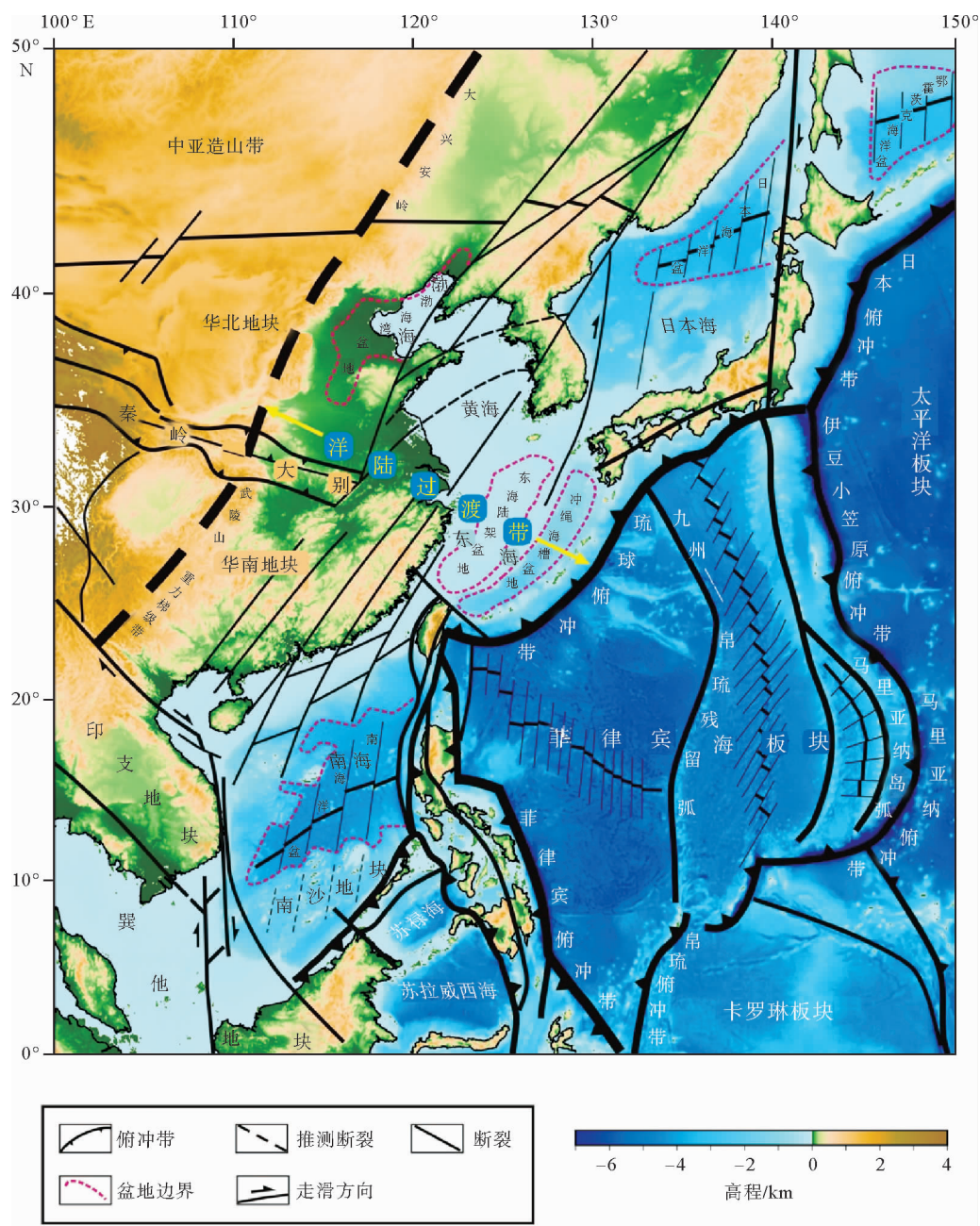


图 2 西太平洋洋-陆过渡带地貌格局及研究区域位置(据姜素华等^[6])

(高程数据源自 BGI 网站 <http://bgi.omp.obs-mip.fr>)

Fig. 2 Elevation and bathymetry of the West Pacific Continent-Ocean Connection Zone and location of the Study Area(after Jiang et al. ^[6])

太平洋是地球表壳大洋中的长寿古广大洋,分古今太平洋,历经长期演化,现今处于中心内部伸展与周缘消减收缩演变之中。古今洋域中包括诸多板块,有的已消亡,有的正在生长演化中,是全球最大的洋域,在全球构造中占据重要独特位置。现今太平洋中脊以西为太平洋板块,西太平洋指白令海峡-夏威夷群岛-社会群岛等玻利尼亚岛链以西区域,宽阔而复杂,从远洋深海大洋到西侧与欧亚大陆板块

交接俯冲拼接的洋陆过渡带,并且双重俯冲带与岛链,挟持菲律宾、卡罗琳等板块和东亚系列多样沟弧岛链及边缘海盆,南部与印度-澳大利亚板块、印度洋洋-洋交接拼合,壮观而富有当代地学发展大量前沿信息和人类社会需求。在西太平洋相关的诸多关键科学问题中,首先是原三角型的太平洋板块初始如何形成和其后各板块是如何发展演化的。因为太平洋域各板块的形成演化涉及全球,尤其对东亚陆

缘很多关键科学问题,极为重要。关于这一问题认识前人分为两派:第一派起始于 RRR 型三节点^[8,9];第二派认为是三条洋中脊走向不交于一点,相向拓展圈定成一个三角型块体,之后围绕该核心向外增生扩大为现今规模。也就是说,太平洋板块完全起源于洋内板块环境。然而,该模式最大的问题是现今新的研究,发现太平洋板块不是原认为的全部由洋壳组成,而是其东侧现今板块边界是加利福尼亚湾的洋中脊-圣安德烈斯大陆型转换断层-胡安·德·富卡洋中脊,该边界西侧还存在一小块岛弧地体——格雷罗地体;同样,其西南侧的现今板块边界是 Alpine 转换型陆缘,在太平洋板块内部存在新西兰西南及邻近海域的 Campell 海台及 Chatham 海隆,最近被认为是淹没的大陆地块。尽管这些都需要深入研究,但已成为太平洋板块起始于完全的洋内环境似乎无法解释的事实。好在目前这块陆壳位于太平洋板块的东侧边缘还可通过洋中脊跃迁和俯冲俘获微陆块来解释,但是对于其太平洋板块西侧古老年龄的三角型核心的形成过程依然没有很有说服力的模式,因而仍值得深入探索。特别是东太平洋海隆的 Galapagos 三角形微板块的形成值得进一步研究对比分析。迄今关于太平洋域及其中板块起始也尚无共识,尚需再探索研究。这一问题的研究涉及西太平洋和洋陆过渡带的地质基础及其形成演化与机制,实属基本关键科学问题。

1.2 洋中脊千万年行为与增生方式、动力因素

磁条带很好地展现了洋底每百万年的侧向生长过程,瓦因-马修斯假说很好地说明了洋壳侧向生长机制^[10,11]。但是在 0 Ma 磁条带内的洋壳生长行为似乎并不是侧向增生,而表现为垂向增生过程,时间也小于百万年尺度。初步测年结果解释现今洋中脊熔岩流的事件具有千年尺度过程,那么这些千年尺度洋中脊生长行为如何转换为百万年尺度行为就成为洋中脊生长,乃至洋壳形成机制的关键科学问题。若要揭示百万年尺度内的千年洋壳增生方式,就必须获取洋壳的全岩心,这应当是大洋钻探计划钻穿正常 Moho 面的真实需求,尽管海底有些地方 Moho 面直接异常剥露海底。对洋中脊每百万年磁条带获取新鲜岩心样品,开展精细年代学研究,不仅可以弥补洋壳生长研究中缺失的时间环节,还可以揭示洋壳增生的百万年尺度过程到千年尺度行为,进而研究不同时期或时间尺度下洋中脊岩石成分变化极其控制因素。关于洋中脊深部岩浆房什么过程决定了浅部不同时间尺度行为? 岩浆或岩浆房沿洋中

脊分段如何分布与迁移、运聚? 不同速度洋中脊增生差异的深部基础是什么? 这些行为如何控制热液喷口分布? 如何利用水听器探测洋中脊行为(如微地震、断裂拓展、流体-岩浆运移)的时空演变? 等等,都需统一思考研究。

1.3 太平洋板块为何转向、如何与洋陆过渡带形变过程关联

前人研究揭示,中生代中晚期太平洋板块转向与华北克拉通破坏密切相关^[12],新生代太平洋海山链转向与华北板内盆地形成过程也具有一致性^[13]。这种关系意味着洋陆过渡带,特别是俯冲带两侧板块,在运动学上应是紧密耦合的。但是如何通过俯冲带研究证实这个过程是耦合还是非耦合运动,俯冲带两侧洋、陆板块如何耦合? 俯冲是否为板块驱动力? 解决这些问题目前尚显得很困难。现有研究初步发现^[14-16],太平洋板块内的事件序列为:135 Ma、100 Ma、85 Ma、45 Ma、21~13 Ma 的重大事件。然而,大量西太平洋的板块重建,特别是 Mueller 等^[9]的最新重建,也揭示 60 Ma 之前太平洋板块尚未开启直接作用于东亚陆缘的过程。Liu 等^[17]也揭示俯冲滞留于东亚东部地幔转换带的为太平洋板块,但这个过程仅在 30 Ma 内就完成了。陆地界和海洋界地球科学家研究的成果出现如此大的不同,因此,洋陆过渡带中生代形变过程是否完全与太平洋板块俯冲直接相关尚还值得仔细考虑^[18-21]。迄今的研究认为,古今太平洋域诸板块依次变换转向演化,对东亚洋陆过渡带或大陆边缘有直接作用,但研究也表明,精细重建古今太平洋板块格局及其时空演化才是深化关联洋陆动力过程或关系的关键。

1.4 转换断层如何转变为洋内弧

近来,Niu 等^[22]提出板块内部(被动陆缘)发生俯冲启动的条件必然是密度存在差异,正如许多被动陆缘的陆壳和洋壳之间。然而,一些洋内或板内并不存在密度差,因此,洋内或板内俯冲启动机制仍是 Niu 等^[22]模式没有完美解决的科学问题。西太平洋马里亚纳岛弧是一个典型的洋内弧。最早由 Hilde 等^[23]提出:马里亚纳岛弧的形成是一条近南北走向的转换断层或破碎带转变为俯冲带,其机制大概是太平洋板块西侧的古老大洋岩石圈比年轻的菲律宾海板块显著增厚,不同厚度的岩石圈接触部位必然产生边界对流(edge convection),触发厚的岩石圈俯冲。这个模式中洋中脊垂直东亚陆缘俯冲,可以解释东亚陆缘的板片窗问题^[24]。但是,

Hilde等^[23]的模式无法解释古地磁资料揭示的婆罗洲地块近90度旋转的事实。Müller等^[9]、Seton等^[25]的板块重建也认为马里亚纳岛弧形成于一条转换断层或破碎带,但不同的是,在其重建模式中,马里亚纳岛弧的原始走向是东西走向,然后旋转为现今的南北走向,这很好解决了婆罗洲地块的90度旋转问题。但是,该重建模式中依泽奈崎板块与太平洋板块之间的洋中脊始终是平行东亚陆缘,且该洋中脊于60 Ma才开始俯冲到东亚之下。因而,该模式难以解释中国东部、日本等陆缘发育的与洋中脊俯冲相关的埃达克岩成因^[24,26-28]。因此,有必要考虑,可能客观更为复杂,其中包括目前尚还不能认知的问题,甚至可考虑埃达克岩成因的不同机制问题。因此,关键是思考研究精细重建洋内板块格局,揭示洋内弧成因及其复杂情况。

1.5 洋中脊为何跃迁和微板块如何形成

在洋内尚存在当前未被人们所认识的复杂构造过程。例如:Shatsky海隆西侧由于洋中脊的跃迁而衍生出一个新的微板块,本文称为跃生微板块(Ridge-jumping);也存在一些海山俯冲或深海洋底高原堵塞俯冲带,导致大陆边缘形成一个微板块,称为增生微板块(Plateau-docking);一些弧后盆地打开后,俯冲带和弧后新的洋中脊之间出现一个微板块,如马里亚纳岛弧自身可能就在演化为一个微板块,本文成为裂生微板块(Backarc-rifting);在洋中脊行将消亡到大陆边缘时,锯齿状的洋中脊与弧形海沟往往圈闭出一些微板块,叫残生微板块(Ridge-subducting);相反,在洋中脊部位,由于洋中脊的纵向拓展、链接过程中,出现叠接扩张中心,逐渐演变为新的微板块,称为交生微板块(Ridge-overlapping),等等。这些微板块的形成过程都非常复杂,洋内和洋中脊也复杂多样,搞清楚这些微板块的产生过程、机制,才有助于重建古大洋内部的洋内构造格局,以解决当前古板块重建中洋内构造格局通常是空白的局面。

1.6 弧后盆地玄武岩浆成因及其地球化学属性和弧后转换断层成因

弧后盆地一般是指具有洋壳的深水盆地,但是多数弧后盆地洋壳具有显著不同于正常或标准洋壳的厚度。那么其增生机制是否与洋中脊增生机制一样?为什么弧后盆地初始洋壳厚度不同于标准洋壳厚度?其岩浆生长机制是否不同?地球化学特征多大程度受破裂的大陆岩石圈地幔组分影响、俯冲组

分影响、大陆岩石圈下软流圈成分(可能不同于洋中脊形成于典型的大洋岩石圈下软流圈之上)影响?数值模拟揭示,一些俯冲带可大尺度发生突发性后撤,进而在洋内启动新的俯冲带,出现新的弧后盆地,且这些弧后盆地的岩浆起源于大洋岩石圈下软流圈,这些都可能引起弧后盆地地球化学属性的多样性与多解性。对不同扩张速度的洋内弧,其地球化学特性又有何异同^[29]?弧后盆地的转换断层形成与洋陆过渡带先存走滑断裂有何种关联?例如,冲绳海槽的转换断层走向到底是NW向还是NNE向^[30]?如果是NNE向,与东亚陆缘大规模同向走滑断裂有何关联?上述问题都涉及了洋陆过渡带复杂沟弧盆体系形成演化的洋陆相互作用、复杂机制与其结构属性的多样性结果与效应。

1.7 板块驱动力和俯冲带如何启动、主动还是被动俯冲,俯冲后撤是主动还是被动

大洋俯冲与洋内俯冲起始、起因及其作用与动力学意义迄今尚未完全解决,始终事关重要。西太平洋及其洋陆过渡带具有此类突出问题,值得重点解剖研究,以求解决突破。

西太平洋大陆边缘何时何因由被动陆缘转换为主动大陆边缘^[31,32]?一系列不同时期的俯冲带是如何形成的?分别始于何时?有多少种不同成因类型?洋内俯冲如何启动?转换断层是如何转变为俯冲带的?这些问题依然存在巨大争论^[32]。这里主要侧重探索俯冲启动后,俯冲作用是主动俯冲还是被动俯冲,也就是说,俯冲作用是否为板块驱动力,并就其驱动力比较分析,存在什么问题。以下就俯冲作用相关的板块驱动力问题,做一简明评述,供讨论,以促进这一学界普遍关注问题的深化研究。

(1)洋中脊推力:大洋软流圈总体是洋中脊处抬起,而俯冲带处降低,岩石圈与软流圈的边界是一个斜面。此斜面在洋中脊轴部的位置最高,在板块的远端较低,岩石圈的横断面是楔形。当岩石圈离开洋中脊时,由于冷却作用逐渐达到地幔的较深处,使得软流层物质持续不断并新增生于上覆密度较大的冷岩石圈底部,因而越来越厚。岩石圈增厚使整个板块产生水平密度差,并在岩石圈底部形成斜面。洋中脊高耸的地形所固有的势能迫使洋中脊向两侧扩张运动,以达到较低的能量状态。因此,这个拉张型板块边界上分离的板块会在重力作用下引起向下的滑移,称为洋中脊推力。这一过程的主导因素是沿整个岩石圈板块的水平质量差以及由于岩石圈呈楔形所形成的表面斜坡,从而导致了板块沿斜坡的

滑移运动。经典板块构造理论认为,这种离开洋中脊的重力滑移(或中脊推力)是驱动板块运动的一种主驱动力。这种力源于洋中脊轴下不断涌升的地幔物质,就像在板块之间不断打进楔子一样,从而把板块向两侧推开。板块内部应力状态以挤压为主有利于洋中脊推力的模式。据研究,这种力垂直作用于洋中脊,其大小与地势抬高的荷重大体相同,不依赖于扩张的速度。但是,洋中脊推力还存在以下疑问:1)液态或粘性的上涌热地幔岩浆能否有能力推动宽达数千千米的固态板块?2)假如非常强调洋中脊推力,像菲律宾海、加勒比等不具备洋中脊或洋中脊死亡并石化的板块同样存在着明显的俯冲运动,其驱动力又是什么?3)冰岛及其他地区的一些基性岩墙的观察表明,这些岩墙显然是张裂环境下自由上升侵入的,属于充填裂隙的性质,因而洋中脊岩浆作用不能作为板块侧向运动的驱动力,岩浆不是强行楔入的,故洋中脊推力就不是岩浆侵入所致,而是大洋板块自身的重力拖拉所致,洋中脊岩浆侵入就变成了被动过程,有人称为脊吸力(ridge suction);4)深潜器考察发现,洋中脊中央裂谷边缘张性裂隙的宽度大于中轴张性裂隙宽度,这种现象也难以用洋中脊推力来解释,尽管20世纪90年代提出了海洋核杂岩来解释;5)尽管通过计算大洋板块有足够的势能克服底部摩擦阻力并向下滑行,但是大洋板块某些部位的运动方向与向下滑行的方向并不一致;6)这种模式,必须首先存在洋中脊或软流圈的上拱,才能存在势能差;7)单独用该力难以解释洋中脊的跃迁和俯冲现象。

(2)俯冲板块的重力拖拉力:岩石圈板块从增生边界运移到俯冲带,经过上亿年的冷却,岩石圈增厚,密度变大。当潜没的板块密度超过周边地幔的密度时,它们的密度差便产生了负浮力。因而,板块年龄越大,冷却也越充分,岩石密度就越大,这种负浮力就更大。此外,板块俯冲时伴随的相变,如辉长岩变为榴辉岩,橄榄岩相变为尖晶石相橄榄岩,从而使板块密度增加,负浮力更大。俯冲板块所具有的负浮力称为重力拖拉力。重力拖拉力传递给整个板块,使其下潜并加速俯冲,而成为原动力。这种动力机制好比水面上的棉花下垂的一角浸在水里,吸水变重的棉花有可能把浮于水面上的整块棉花向下拖拉。特别是,俯冲边界长度最大的太平洋板块具有最高的运动速度,更增加了一些学者对重力拖拉力的青睐。因此,很多人强调俯冲板块的重力拖拉作用,称为俯冲引擎。但是,该模式难以解释以下几个现象:1)那些不具有俯冲带的板块(南极洲板块、非

洲板块)或仰冲板块(欧亚板块、美洲板块等)的运动就与重力拖拉力无关;2)俯冲带的极性倒转和新俯冲带的形成;3)正扩张洋中脊的消亡俯冲;4)大洋岩石圈能否在一端拖拉时具有足够大的力和强度使数千千米宽的洋底岩石圈作为一个整体运动;5)海沟外侧的外缘隆起的存在,显示俯冲板块受到阻滞而弹性弯曲,说明重力拖拉力不总是驱动力;6)重力拖拉力应导致俯冲板块整体处于张应力环境,但大洋板块内部的应力状态总体以挤压为主,如中印度洋的印度-澳大利亚板块内部^[33,34]。

(3)海沟吸引力:由于大西洋扩张,而太平洋收缩,这种差异与太平洋独具而大西洋没有的海沟有关,因而,海沟对陆侧板块有一种吸引力。海沟吸引力可把美洲板块和欧亚板块拖向太平洋周围的海沟。由于地球的半径可能保持不变,大西洋不断扩张的同时,太平洋就不断缩小,海沟也将向大洋方向迁移,或在大洋台地与大陆边缘拼合时发生突然跃迁,相对大洋板块来说,微小的深海台地或海山俯冲无法阻挡大板块的俯冲或改变其固有运动规律。但是,这种海沟吸引力的物理性质迄今仍旧不清楚,也可能实质上是深俯冲的大洋板片相变的重力拖拉力所致。

迄今,人们还提出另外两种吸引力:1)洋中脊吸引力,洋中脊因降压熔融,使得软流层物质向压力较低的洋中脊聚集,因而可能产生洋中脊的吸引力,继而推动地幔对流循环。2)地幔柱吸引力,地幔柱^[35]从地幔深处上涌,对洋中脊会有吸引作用,从而使得洋中脊逐渐向地幔柱靠近,称为地幔柱吸引力,使得洋中脊发生跳跃式跃迁。当地幔柱与洋中脊位置一致之后,大量释放热量,作用力降低,洋中脊会在其它作用力影响下与地幔柱脱藕,移离地幔柱,此时地幔柱又可能变成板块运动的阻力。

新近,一些学者从特提斯带和东亚大陆中新世代,甚至从更古老时代岩石圈板块与大陆长期持续,而且不只是区域性,而是全球规模性的俯冲汇聚的突出现象思考,并从地球卫星研究显示的现代地球超级上升和下降地幔流或柱,位于西太平洋和印度洋与东亚大陆区域,综合考虑,强调地球固体外壳(岩石圈与地壳)相对运动的俯冲引擎作用,和与之相关的地球深部(地幔)质量、密度的非均一与转化等问题,在思考像天文学和物理学中的“黑洞”这样的长期持续巨大超引力问题,是否在地球深层存在,进而并思考是否是地球外壳运动的驱动力问题。“黑洞”是天文学与物理学中一个当代最具挑战性天文学说之一,正在研究探索与争论之中,新的理论也

在不断提出。最初是 20 世纪 70 年代美国物理学家韦勒命名提出,英国天文物理学家霍金很大发展了黑洞理论,并提出了黑洞在形成过程中,其质量减少的同时还不断以能量形式向外界发出辐射,这就是“霍金辐射”理论。显然作为天体的地球,研究其形成与动力学规律,引用天文物理学的新研究、新理论、新思维是自然的,应当重视,认真对待,慎重深入学术思考,借鉴引用,探索求解地球基本核心科学问题。学习理解认识黑洞学说实质内核,从而面对地球客观,求实深入思考分析、探讨,正如天文物理学中“黑洞”学说的争论探讨一样,我们地球科学面对地球,借鉴思考研究,也是一个更具挑战与艰辛的过程,自然不是近期马上可以解决的。要和其他关于地球固体外壳块体运动驱动力的研究争论一样,要在实践研究中持续去探索求解。

关于板块运动和俯冲驱动力迄今有种种多样假说推测与想法,争论也一直在进行中,目前较多在质疑地幔对流假说中,更多倾向于负浮力的认识。但无论如何,板块构造驱动力问题始终是一根本性的基本问题,有待解决。

1.8 洋底属性问题:鄂霍茨克海基底? 洋内陆壳?

以往大洋钻探揭示,洋底发育一些陆壳。但这些陆壳主要散布在慢速-中速的被动陆缘,有的也远离陆缘很远,甚至残存于大洋中间。这些现象成为反对板块构造理论的重要依据之一。然而,洋陆转换带的提出,认为他们就是极度减薄的孤立陆块顺滑面脱离母体大陆后的残块,较合理解释了陆壳为何会出现在洋壳中这个事实。尽管如此,还有一些洋底的地壳属性值得思考。例如,鄂霍茨克洋的地壳厚度近 20 km,人们常认为是过渡地壳。但地球上洋壳和陆壳之分,有无“过渡壳”,尚是一个较含糊有争议的概念。Yang 等^[36]提出,鄂霍茨克洋为深海高原(洋壳)增生堵塞俯冲带所致,而深海高原正常的地壳厚度可以达 20 km,具有洋壳组成。但到底是洋壳还是减薄的陆壳,目前该区尚无到基底的钻孔,也值得今后注意。此外,在新西兰外海最近发现海平面以下存在一块巨大的陆壳,同样也无钻孔证实,其起因、来源都需值得深入开展研究。特别是对于大陆边缘大陆地壳增生方式或地质历史演化中陆壳增长模式有多少种,也尚需要思考和开拓创新研究。这些问题涉及到大洋形成及基底的复杂性和洋陆交接转换等系列基础性根本问题,值得持续深入研究。

1.9 西太平洋和印度洋及其洋陆过渡带与成矿-成藏-成灾

成矿-成藏-成灾问题是一带一路战略发展中,既有重要社会、经济需求,又有重要科学意义的问题。这类问题,尤其近岸洋陆过渡带已有不少研究成果,但由于政治外交形势和国际争端问题外,在区域成矿与成藏、环境与灾害等科学问题上,整体还存在很多需进一步加强研究和勘探的问题。

(1)西太平洋深水远洋区,我国整体掌握薄弱,当前关键是在我国冲出第二岛链,在国家重点加强军事目的同时,如何加强海洋科学考察,掌握更多实际资料,争取远洋公海资源、领土权益,统筹聚焦科学问题。特别需要国家整体统筹、思考、规划西太平洋深海远洋区的科学前沿战略目标、实现途径和关键科学问题。

(2)西太平洋洋陆过渡带,尤其针对近岸边缘海盆的长期研究与勘探,国内外都作了不少工作,现已有一定的基础研究和成果积累,目前关键是在国际海洋权益争端趋紧的形势下,如何在已有研究和成果基础上,综合深入整体与时空分带分区分层,聚焦核心问题,认知属性、特点、规律,统一筹划,重点突破,特别是急需明确西太平洋洋陆过渡带油、气、水合物和金属成矿整体与各自区块、层带的目前关键问题和需重点突破的问题是什么?

(3)西太平洋洋陆过渡带地表系统研究已有不少研究和成果,现最需要的是其大科学、多学科、统一整体、交叉融合,开展地表系统成矿-成藏-成灾问题的合作研究,提出整体表生成矿-成藏-成灾系统的根本科学问题,进行新研究,新发现,新规律,新认识,总结认知新理论。

(4)现在我国需要对印度洋、非洲东侧洋陆关系、属性及其成矿-成藏进行综合系统深入评价研究,利用“梦想号”建设契机,促进中国-非盟、中国-东盟政府间更为广泛的大型国际科技合作,推动一带一路的海上丝路建设。

(5)加强印度洋洋中脊热液硫化物成矿、太平洋富钴结壳或锰结核勘探区域的成矿地质背景与成矿潜力评价与研究,发展先进的海底探采技术和设备,选拔一些有德性、有真才实学的高端人才担当国家海外勘探重任,维护国家形象和超越国土的国家权益。

(6)需要对印度洋周缘不同类型洋陆过渡带,进行区域海洋地质背景和成矿-成藏综合研究,对印度洋陆缘不同区域与整体特征、规律和潜力价值的综

合整体协调深入研究,首先是整体内部与周缘考察研究,实际掌握、评价、制定规划,重点攻关突破。

(7)从洋陆过渡带深层资源、能源潜力分析,深层含油气残留盆地是未来能源接替区。深层油气成藏系统与表层水合物成矿系统存在何种关联?水合物分解有无导致浅表灾害链的发生?如何防治与监测?

1.10 深碳循环、水循环、元素循环、生源要素循环与全球变化

广袤海底的上亿年沉积记录就是全球变化的历史档案。要构建地球地表系统理论,必须认知深时地球气候变化,因而通过大洋钻探获得更多岩心,细化全球不同时空古气候记录,对约束全球古海洋、古环流、古气候等地球系统动力学问题模拟,增强人类认知、预测地球系统未来长周期演变趋势的能力,对规范人类行为和建设宜居地球非常重要。深海沉积物运移到海沟,不仅伴随生源要素的输运和循环,最终还俯冲消减到地幔深部,发生脱水、脱碳、脱硫等,不仅决定深部碳循环或碳储存,同时还以火山喷发、盆地无机二氧化碳藏、碳酸盐岩的化学沉积等形式释放或保存到地球表层系统,决定地球表层系统的碳循环。地表系统与地球深部系统是统一整体地球复杂动态系统的组成部分,紧密相关互馈,深碳循环以及人类活动等这应是地球系统中的一个统一—复杂物质、元素运动系统,需要我们去探索、揭示、认识。地球物质和化学元素循环,如碳循环,有着多样复杂的循环交流运动系统,有海水-岩石圈界面的元素循环、有壳-幔之间的元素循环、有洋-陆岩石圈之间的元素循环,导致一系列不同类型的成岩-成矿过程。这些过程都是目前海底科学很关注的研究方向,也是深部找油气找矿和深海远洋找油气找矿,扩大资源急需探索研究的理论课题。

除上述科学问题之外,还需要关注以下西太平洋的具体重要科学问题:

(1)特提斯构造在东亚如何转换为西太平洋构造域^[37]?

(2)西太平洋洋陆过渡带中生代陆缘性质:安第斯型还是华南型或者是陆内与陆缘复合型?

(3)西太平洋大陆边缘的独特性复杂性与油气-水合物成藏机制?

(4)海底灾害的深部背景和浅部动因是什么?例如,水合物分解是海平面变化所致,还是内动力触发?是水合物分解导致海底滑坡还是海底滑坡导致海底水合物分解?

2 印度洋及相关洋陆过渡带前沿问题

印度洋域的洋陆过渡带涵盖西北印度洋、东北印度洋及其北侧相邻的新特提斯洋构造域(图3)。印度洋也具有很多突出独特特征的地质现象和问题,如其超慢速扩张洋中脊、东经90度海岭和与之平行的查戈斯-拉克代夫海岭、初始俯冲系统、地幔柱-洋中脊相互作用、海洋核杂岩、转换型大陆边缘、斜向汇聚、地球的第三极—青藏高原与走滑型弧后盆地等等,都需分轻重缓急分别探索研究,力求认知解决。

印度洋对于中国发展同样也具有重要意义,北印度洋是“一带一路”战略海上丝路主要组成部分,其重要性在以下方面:(1)社会政治、经济、军事的国家重大需求。①北印度洋及其洋陆交接带是海上丝绸之路,也是我国主要通向世界的海洋大通道,经济贸易要道,是自古以来的海上丝绸之路,今天也是我国与南亚、中东、非洲与欧洲交流沟通的海上必经要道,是我国走向世界的友谊与合作之路。②我国和世界贸易、经济交往、资源能源海上交通大动脉,是我国和欧亚非能源油气,包括西南印度洋海底资源的海上运输通道。③是当代国际形势中,军事要道与阵地,包括我国在吉普提、瓜达尔港、汉达港、马六甲海峡以及中巴经济走廊,中缅石油管道、中马(马来西亚)合作建港等的重要政治经济合作与打击海盗保卫航海安全等,因此印度洋,尤其北半部分在我国国家战略发展中占据突出重要位置。(2)富有当代地球科学发展前沿的系列重大重要科学信息与理论问题:印度洋富有不同于太平洋的一些独特特征,诸如新生洋内俯冲系统、超慢速扩张脊、海洋核杂岩、海山链(热点轨迹)、青藏高原隆升的档案室—孟加拉巨型海底扇、东非转换型陆缘、斜向俯冲、Whar-ton等死亡的洋中脊、拉分型边缘海等系列科学问题都值得深入探索,具重要科学实践与理论意义。

基于目前研究进展和发展需求,简要概括综合讨论以下主要问题。

2.1 印度洋初始打开、演化与超大陆裂解机制

关于印度洋何时以及如何起始打开与演化的,与冈瓦纳超大陆的裂聚演变有何准确的时空演变关系,一直是印度洋研究的一个根本的基础科学问题。已有研究表明,印度洋内还记录有冈瓦纳大陆裂解的全过程,可以深入研究分析印度洋的起始与时空演化,同时还有一有趣的问题,即认知一个超大陆如

石圈流变关系如何?孪生对称海洋核杂岩形成与大洋岩石圈流变关系又如何?不同扩张速率 OCC 的工作机制如何?是否广泛存在辉长岩嵌入到橄榄岩或蛇纹岩中的布丁构造?洋底岩石圈地幔是否完全是由橄榄岩构成的?什么因素决定海洋核杂岩的非对称和对称生长机制?形成慢速扩张脊厚洋壳的控制因素?海洋核杂岩如何控制有利成矿区?等等。

2.3 东北印度洋洋内俯冲带成因及洋内俯冲是主动俯冲还是被动俯冲

东北印度洋(也称中印度洋)洋内是新生俯冲带还是俯冲系统?基底尺度反射地震剖面^[45,46]揭示,海底面遭受逆冲错断,这是全球海域唯一可见逆冲断层的海域;而地壳尺度反射地震剖面^[47]揭示,莫霍面也被错断,因而可能不只是一条逆冲带,而可能是一条俯冲带。可是大洋岩石圈尺度是否错断目前还没有证据。东北印度洋是未来洋内俯冲带形成的地带,近 5 年来已经围绕该海域,在 Nature, Science, Geology 等发表了很多篇文章^[46,47],也有人将这个逆冲带与青藏高原隆升等联系起来^[38-41,48]。而且,这条逆冲带的形成,还可能是苏门答腊 9 级等大地震的根本原因^[49,50]。如果说西太平洋洋内俯冲是洋内冷却程度不同的洋壳密度差启动了俯冲的话,中印度洋洋内近东西走向逆冲带的俯冲启动则是处于同一大洋板块的内部,且垂直转换断层或破碎带(东经 90 度海岭),应当不是密度差所致,那么是什么原因导致了全球大洋内新近形成了这条俯冲系统?如果不是密度差所致,那这条带的启动就不是主动俯冲;如果是被动俯冲,又是何因诱发其俯冲?迄今,只能据其走向平行喜马拉雅造山带判断,可能是印度板块与欧亚板块碰撞到极限或青藏高原隆升到极限,触发了南部印度洋洋内出现俯冲带,以吸收南侧不断扩张的印度洋洋中脊产生的推力,但该逆冲带启动时间现初步确定为 7 Ma^[48]。如此,就产生两个问题:1)洋中脊必然是驱动板块的主要推动力,2)需要钻穿印度洋内该俯冲带上地层,揭示其逆冲启动时间是否和青藏高原隆升具有关联。这些还尚需再研究。

2.4 超慢速洋中脊千年、万年行为与增生方式

印度洋还有一个特点是:慢速-超慢速扩张。慢速-超慢速扩张脊的岩浆供应很弱,那么板块构造理论所指的岩浆沿洋中脊上涌同时推动两侧板块相背分离运动的洋脊推力就可能极其不重要;印度洋周边又很不发育俯冲带,俯冲拖拉力也不强,那么是什

么导致印度板块大规模快速运动?以及印度和澳大利亚板块之间的显著差异运动呢?这种慢速-超慢速的洋中脊构造-岩浆-成矿过程又受什么控制:洋壳的控制因素?海洋核杂岩的差异成因?控矿要素是什么?超慢速洋中脊千年、万年行为与增生方式如何?特别是海洋核杂岩的存在似乎表明,慢速-超慢速扩张洋中脊是被动拉开的,因而洋中脊推力不可能是主动驱动板块运动的力源,但慢速扩张脊似乎又不一定受构造扩张控制。洋中脊之外,洋中脊的轴外过程对大洋岩石圈演化起了何种作用,例如对洋中脊死亡与跃迁、古老俯冲板块的滞留、海山成因等有何影响。扩张速率与洋壳构造不均一性有无关联?是否有地幔(温度、组分)或其他作用影响等等,是印度洋研究的另一个突出问题。

2.5 洋中脊死亡机制?洋中脊如何导致地幔柱分裂?

印度-欧亚碰撞可能迫使洋中脊跃迁或死亡,乃至诱发微板块形成,因而印度洋内的微板块形成可能记录了印度-欧亚初始碰撞时间;而更古老的(80 Ma、60 Ma)洋中脊跃迁或死亡^[51,52]也可能记录了东冈瓦纳大陆的重大裂解事件,此外,其跃迁机制与印度洋中广泛发育的地幔柱或热点的重新定位慢速扩张脊也可能存在关联,也是印度洋研究中需思考探讨的一个重要问题。

2.6 大火成岩省与海山链和印度洋内印度板块与澳大利亚板块间突出差异北向运动

印度洋中突出发育有两条近南北向的海山链:查戈斯拉克代夫海岭和东经 90°海岭(图 3),最北端分别与德干高原玄武岩和拉治马哈(Lajmahal)玄武岩对应。它们记录了印度板块向北大规模迁移轨迹,这两条海岭也记录了印度板块两侧迁移速度的差异,可以用来检验印度板块碰撞模式^[39]。特别是东经 90°海岭在中国内陆的龙门山-贺兰山南北构造带的延伸,乃至延伸到贝加尔湖,这到底代表了什么样的全球或深部动力背景?什么时间形成动力学上一致的南北构造带?为什么,是什么动力造成以 90°海岭为界,印度与澳大利亚两板块出现巨大差异的北向运动,以致控制了现今亚洲与印度-澳大利亚间整个区域大陆-海洋山川地形格局,呈现青藏高原、东南亚沟弧盆、边缘海,乃至小洋盆等的复杂变形组合与构造扭曲旋转、澳洲大陆以东印度洋与太平洋的洋内拼接。东经 90°海岭反映了新特提斯洋什么过程^[53]?其运动方向与现今印度洋洋中脊扩

张方向有巨大变化,时间为40~38 Ma左右,这种转变与青藏高原隆升或造山有何关联?且Borken和Kerguelen热点的分离伴随这个方向变化,那么,是洋中脊扩张方向变化导致热点分离,还是热点分离导致洋中脊扩张方向变化?

2.7 斜向俯冲与斜向弧后盆地开裂机制和斜向小洋盆成因

印度洋东北侧发育巽他俯冲带,与太平洋不同的是以斜向俯冲为特色。沿斜向俯冲引发大地震以往被忽视。2004年苏门答腊9级大地震造成24万人死亡之后,才引起了高度重视。伴随斜向俯冲发育和青藏高原一些块体的挤出,走滑拉分成因的安达曼海弧后盆地形成;斜向俯冲消减同时,俯冲带也往往发生弯曲^[54],然而,班达海旋卷构造与班达弧成因值得从区域整体构造与运动学开展深入分析,可能还与澳大利亚板块向北推移和楔入有关。可见,印度洋东北侧存在类型多样的洋陆相互作用。

2.8 洋陆转换带与转换型大陆边缘的消亡机制

西太平洋洋陆转换带研究最近取得一些进展,但是印度洋洋陆转换带研究相对薄弱,这严重制约了对冈瓦纳大陆破裂过程和机制的认知。印度洋域中的几个板块,多是洋陆板块而不完全像太平洋板块的主体单一的洋板块,且洋陆关系,即洋陆转换带也主要为被动陆缘,如印度板块中印度大陆周边,澳大利亚板块中的洋陆被动陆缘。印度洋南侧则以东、西两个洋中脊与南极洲板块相邻。印度洋中以东经90°海岭为西界的澳大利亚板块,则是澳大利亚大陆周边均以被动陆缘构成洋陆过渡带,其北与东侧则均以洋壳岩石圈向外俯冲,北为洋陆俯冲形成洋陆过渡带,东侧则是以洋洋俯冲-转换断层构成印度洋与西南太平洋的拼合。其中特殊的是:印度洋西侧与非洲板块东侧的洋陆关系还有争议,是被动型洋陆过渡带,还是转换型,尚无共识,但倾向于后者,认为印度洋最为特色的大陆边缘是非洲东侧的转换型大陆边缘,该大陆边缘向北为欧文破碎带,该破碎带在红海-亚丁湾小洋盆形成过程中又起了何种作用,但也有争议。转换型陆缘是三大类陆缘中研究最为薄弱,知之甚少的一类。其消亡过程中是什么场景和出现什么产物尚不清楚,但这类研究对认知地史期间板块平移拼贴将具有重要意义。

2.9 AAD与地幔冷点、下降流

AAD是澳大利亚和南极板块的离散板块边缘,

该海域正好介于全球两个地幔低速区之间,因而被认为是一个全球地幔下降流区域。层析成像揭示,该海域地幔深部存在高速体,被认为是俯冲的古老洋壳板片,且古老的俯冲板片存在深、浅部耦合效应,使得该区表现为水深最浅、重力值最高、洋壳最薄等特征。这些滞留板片是洋内俯冲还是洋陆俯冲、俯冲时间如何、滞留板片年龄结构与新特提斯洋消亡的关系等都不清楚。特别是该区还可能发育海洋核杂岩,那么一个地幔冷点区域,海洋核杂岩形成机制又是什么?综合显示这是一个印度洋域中,富有壳幔特异关系的地区,也关系到洋中脊冷点的太平洋板块增生问题。

2.10 洋中脊-热点相互作用过程如何

超慢速扩张脊洋中脊岩浆房不很发育,那么超慢速扩张脊的热液喷口形成的热来源和机制可能不同于岩浆房发育的太平洋海隆热液喷口,据此,快速与超慢速扩张脊热液硫化物成矿有何差异?是否超慢速扩张脊的热液喷口形成必须有洋中脊之外的额外热源供给,它与地幔柱或热点提供异常热有无关联?西南印度洋已发现的24个热液喷口中,20%(5个)受热点的热供应,80%发育在超慢速-慢速扩张脊的构造背景下;且已发现的热液多分布在正常洋壳和薄洋壳区,而在明显受热点影响的35°~47°E和0~10°E西南印度洋洋壳增厚脊段并未有热液发现,缺少热液运移通道还是其他原因?可见,洋底热状态与其非均一性值得深入分析研究。

此外,印度洋还需要关注如下的关键科学问题:

(1)冈瓦纳大陆裂解过程中,新特提斯构造域一系列微板块的撕裂机制如何?

(2)印度洋不同洋陆过渡带周边大陆边缘的油气-水合物成藏机制等能源资源研究。

3 西太平洋与欧亚、印度洋的板块交接转换及动态演化

太平洋与太平洋板块是相关而不同的两个概念。太平洋是现今大洋的地理概念,而后者是地质概念中的太平洋域中的现太平洋板块,是指太平洋域中以其洋中脊(包括北美被圣安德列斯断层转换断错至加拿大的胡安·德·富卡洋中脊)以西,至欧亚与印度-澳大利亚板块俯冲边界间的大洋板块。太平洋是地球上长寿大洋域,其中古今曾包含有众多不同板块,现今太平洋板块是长期演化至今的大洋板块,现占据太平洋域绝大部分范围,现今在太平

洋以东与南美板块间还有可可斯和纳兹卡板块等。西太平洋现泛指现太平洋西半部,通常指夏威夷-皇帝海山-波利尼西亚群岛为界以西的太平洋板块区域。

对于古今太平洋西部与欧亚板块东部和印度洋、印澳板块这一全球规模的洋-陆、洋-洋巨型板块汇聚、拼合、交接所构成的壮观雄伟构造区,也可以说是地球上两大洋三大板块洋陆撞击奏出的最强音和波澜壮阔的洋陆交响乐!对此,基于新的研究进展,现思考提出以下3个问题供考虑讨论。

(1)由以上综合论述,显然可见太平洋板块的现今状态及其与欧亚板块及其大陆和印澳板块及其澳大利亚大陆的洋-陆和洋-洋板块交接转换过渡带的现状,是经长期演化的综合结果,有着长期复杂的纵横深浅的地质演变进程,目前世界地学界尚不完全清楚,值得研究。

(2)现今西太平洋与欧亚和印度洋交接转换带,从北部阿留申群岛西端-勘察加-千岛群岛-日本-马里亚纳群岛与冲绳弧沟系及其间夹持的菲律宾板块、卡罗林纳群岛-汤加岛弧一直再到新西兰南的普伊塞哥(Puysegui)海沟,形成全球巨大漫长的岩石圈板块拼合交接带,几乎贯穿地球南北,宽大分带,北半部与欧亚板块洋-陆俯冲拼接,并形成双岛弧带并夹持中小板块,南半部与印度洋以洋-洋俯冲-转换岛弧拼贴,独特而复杂,不但是地球上部洋陆岩石圈特异突出的全球规模的构造带,复杂的洋陆沟弧盆和洋-洋俯冲-走滑转换岛弧链构成的构造地貌地形单元,同时它控制影响着地球表壳结构与地表系统水、气、陆地不同圈层的时空复杂相互作用与演化,而且它记录着中生代,尤其现在地球深层洋、陆地幔状态及相互作用,并突出反映出地球深层地球动力学作用与过程对地球表层系统及其动力学作用系统巨大的控制与影响和反馈互动动态演化趋势。因此,以大科学工程多学科交叉深入综合系统研究西太平洋古今与欧亚、印澳大陆和印度大洋板块的俯冲拼接转换作用和深浅地球动力学互馈作用与规律,是当今地球科学发展前沿的重大命题。

(3)古今太平洋板块西侧,除如上述的欧亚大陆板块和印度洋洋内板块(其中包括有印度和澳大利亚大陆块体,陆块与洋块共同组成的洋陆板块)外,它古今还与介于欧亚和印度板块间的古新特提斯洋相关,其中古特提斯已消减碰撞造山,而中生代以来新特提斯从欧洲阿尔卑斯到亚洲喜马拉雅已完成陆陆碰撞封闭造山,并造成新特提斯洋的消亡封闭和特异的青藏高原的大范围隆升,是现在世界最高的山峰与高原和世界最低最深的马里亚纳海沟并列

所在之地。但从青藏那加结以东,东南亚缅甸马泰印尼一直到印尼班达海与西太平洋板块交接,还留下一个尚无完全陆-陆俯冲碰撞拼接的残余沟弧盆系统,而且在苏门答腊岛南缘,为现代印度洋板块俯冲带所复合,而成为现印澳板块北缘,向欧亚大陆和东南亚残余新特提斯弧盆陆缘海盆系俯冲的边界。如前已述,这里还特别值得强调和值得我们研究的是:印澳板块以印度洋 90° 海岭为界,分为两个块体,突出呈现印度板块快速北向运动,造成巨大喜马拉雅造山带和青藏高原,地壳几乎收缩2000千米,而澳大利亚板块迟迟慢速北进,不与欧亚大陆拼合,在阿尔卑斯-喜马拉雅构造系统的东端残留着一个残余的东南亚弧盆系,为什么东西部存在这个差异?并造成中国大陆相应出现与印度洋 90° 海岭相对应的贺兰-川滇南北构造带和强烈地震带,而且中国大陆以之为界东西构造与地表系统显著差异不同,这又是什么?同时追根求源,还有一个问题,即东古特提斯如何与古太平洋板块(或古太平洋域中其他板块)是如何交接转换的?新特提斯洋和现今印度洋在欧亚、印澳和太平洋三板块汇聚区域又是如何与太平洋板块交接相互作用的?其深部动力学作用与过程如何?它们的新的从深层到上部的动态趋势如何?与人类生存发展关系如何?这些不仅显然重要,而且是诱人的地学发展前沿重大科学问题,需要开展精细的层析成像、板块重建等综合多学科研究。

关于西太平洋与北印度洋及与欧亚板块汇聚及“两洋一带”的洋陆过渡带还有不少值得探讨、饶有趣味的科学问题,有待解决,不过,我们还是先解决上述问题,进而再追进为宜。

4 展望

西太平洋和北印度洋及其洋陆过渡带和深海大洋以其广阔的空间、多样巨量的资源和特殊的社会、政治、经济、军事地位,已成为世界各国关注的重要战略争夺区域^[55]。同时,“两洋一带”以其广泛综合深邃的未解科学问题和它赋存着当代地学发展大量前沿科学信息,诱人与召唤着地学研究者和科学家去走向海洋,探索创造,特别是如海洋强国已成为我国国家意志和战略目标,“两洋一带”和深海大洋已是海洋科学,包括固体海洋科学(海底科学)和流体海洋科学发展的基地和辽阔天地。目前,我国“十三五”科技创新计划,已启动“科技创新2030-重大项目”,加强深海、深地、深空、深蓝等领域战略高技术部署和研究,海洋,包括深海的探索研究得到高度重

视,“两洋一带”和深海海底迎来了前所未有的发展机会。现在一些科研院所,纷纷重组科研力量,加大人才引进,打造重大科研平台,进军“两洋一带”和深海大洋研究。我国深海领域研究已开始全面布局,在深潜、深钻、深网、深矿、深时、深层油气、深水油气和水合物等领域全面展开。这是中国地学界面临的难得的发展机遇,肩负着国家重任,良机不可错失。

中国的海洋科学,尤其深海远洋与海底科学发展长期滞后,面对国际研究的快速发展,我们应客观冷静地认识我国海洋科学,尤其远洋深海研究与探测监测技术还有大的差距,更要充分特别重视到现在信息网络时代,科技的迅猛发展和国际形势下剧烈的海洋争夺,必然会使海洋,包括固体海洋科学和深海远洋研究与技术快速发展,我们要战略思考,充分意识到未来海洋科学的新发展与动态面貌和新问题。我们要走向海洋强国,需要中国海洋科学与探测技术的发展,要改变现今海洋相关科研碎片化格局,应依照国家重大需求、战略目标和科学发展,统一布局,聚焦核心科学问题,集中精力,重点突破,首先要着力培养一批年轻有为的高水平人才队伍,协同合作创造,攻关占领高地,解决一批重点关键问题与技术,推动引领国家海洋科学发展,跻身于国际前列。

我国海洋科学虽还有差距和薄弱环节,但长期发展在各个学科领域都有重要成果,在一些方面还处于世界前沿,为新的发展奠定了基础。特别近年来,在国家从海洋大国走向海洋强国的战略指引下,整个海洋领域有了显著的快速大发展,从整体发展来看,中国已经具备了很好的技术储备与条件,在海洋领域不仅在深潜的蛟龙号、深网的海底观测网、5 000吨级科考船队方面取得辉煌,包括海洋考察、深海矿产勘查和南海钻探等,而且还即将实现大洋深钻——“梦想号”大洋钻探船的大平台建设上获得突破;深地勘探方面,也突破了万米大陆深钻技术、高精度层析成像技术等;深蓝领域,在动力学模拟技术领域,也即将实现E级超算,为高精度全时地球各系统演变提供了强力计算工具。一批重大装备为实现实施中国海底的科学计划奠定了坚实保障。通过海陆结合,可以围绕深海深地动力、深海“深时”环境、深海深部资源、海-陆系统演变、人居环境预估等开展前瞻性、引领性科学研究。从实现海洋强国和一带一路国家战略发展思考与瞻望,西太平洋和北印度洋及其洋陆过渡带,即“两洋一带”可以是为实现国家战略目标,发展海洋科学的重点突破口,充分发挥上述国家已具备的技术与条件和原有的研究基

础,聚焦“两洋一带”具有满足国家重大需求的当代固体地球科学前沿引领性重大核心科学问题,诸如,板块动力学与大陆动力学和地球动力学,洋壳转换与俯冲动力学和壳幔冷热流体系统,极端条件下生命和生态系统,从近岸到深海大洋资源、能源、环境与灾害,地表系统(大陆、大洋和洋陆系统)和深部系统耦合与非耦合关系(包括深海大洋热液流体系统和大洋温盐流体系统)等,重点突破,一定会有新研究、新发现,提出新认识、新观点和系统新理论,为适应满足国家需求,引领发展海洋科学和地球科学,深化发展当代板块构造理论,为创建地球系统科学理论,为构建天体地球动力学理论,做出中国海洋强国应做出的努力和贡献,创造和奏出世界最雄伟壮美的大洋和洋陆交响乐!

参考文献(References)

- [1] Hou Z Q, Zhang H R. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 70: 346-384.
- [2] Richards J P. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: from subduction to collision[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 70: 323-345.
- [3] Deng J, Wang Q F, Li G J. Tectonic evolution, superimposed orogeny, and composite metallogenic system in China[J]. *Gondwana Research*, 2017, doi: 10.1016/j.gr.2017.02.005. (in Press)
- [4] 甘克文. 特提斯域的演化和油气分布[J]. *海相油气地质*, 2000, 5(3-4): 21-29. [GAN Kewen. The Tethys evolution and hydrocarbon distribution[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2000, 5(3-4): 21-29.]
- [5] 丘东洲, 谢渊, 李晓清, 等. 亚洲特提斯域岩相古地理与油气聚集地质特征[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(2): 41-51. [QIU Dongzhou, XIE Yuan, LI Xiaoqing, et al. Geological characteristics of lithofacies paleogeography and hydrocarbon accumulation in Asian Tethyan tectonic domain[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(2): 41-51.]
- [6] 姜素华, 高嵩, 李三忠, 等. 西太平洋洋-陆过渡带重磁异常与构造格架[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 152-170. [JIANG Suhua, GAO Song, LI Sanzhong, et al. Gravity-magnetic anomaly and tectonic units in West Pacific Continent-Ocean Connection Zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 152-170.]
- [7] Li S Z, Santosh M, Zhao G C, et al. Intracontinental deformation in a frontier of super-convergence: a perspective on the tectonic milieu of the South China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 313-329.
- [8] Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin[J]. *The Geological Society of America, Special Paper*, 1985, 206: 1-59.

- [9] Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Long-term sea-level fluctuations driven by ocean basin dynamics [J]. *Science*, 2008, 319(5868): 1357-1362.
- [10] Vine F J, Matthews D H. Magnetic anomalies over oceanic ridges[J]. *Nature*, 1963, 199(4897): 947-949.
- [11] Vine F J, Wilson J T. Magnetic anomalies over a young oceanic ridge off Vancouver Island [J]. *Science*, 1965, 150(3965): 485-489.
- [12] Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, et al. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a Backarc setting: evidence from crustal deformation kinematics [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1): 86-103.
- [13] Huang L, Liu C Y, Kusky T M. Cenozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone (East China)—Constraints from seismic data[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(3): 1079-1095.
- [14] Suo Y H, Li S Z, Yu S, et al. Cenozoic tectonic jumping and implications for hydrocarbon accumulation in basins in the East Asia Continental Margin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 88: 28-40.
- [15] Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, et al. Continental Margin Basins in East Asia: tectonic implications of the Meso-Cenozoic East China Sea pull-apart Basins[J]. *Geological Journal*, 2015, 50(2): 139-156.
- [16] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 249-267. [SUO Yanhui, LI Sanzhong, CAO Xianzhi, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate [J]. *Earth Science Frontier*, 2017, 24(4): 249-267.]
- [17] Liu X, Zhao D P, Li S Z, et al. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 464: 166-174.
- [18] 金宠, 李三忠, 王岳军, 等. 雪峰山陆内复合构造系统印支—燕山期构造穿时递进特征[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 598-607. [JIN Chong, LI Sanzhong, WANG Yuejun, et al. Dischronous and progressive deformation during the Indosinian Yanshanian Movements of the Xuefeng Mountain intracontinental composite tectonic system[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 598-607.]
- [19] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553-1582. [ZHANG Guowei, GUO Anlin, WANG Yuejun, et al. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(10): 1553-1582.]
- [20] 张剑, 李三忠, 李玺瑶, 等. 鲁西地区燕山期构造变形: 古太平洋板块俯冲的构造响应[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 226-238. [ZHANG Jian, LI Sanzhong, LI Xiyao, et al. Yanshanian deformation of the Luxi area: tectonic response to the Paleo-Pacific Plate subduction[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 226-238.]
- [21] 郭润华, 李三忠, 索艳慧, 等. 华北地块楔入大华南地块和印支期燕山构造[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 171-184. [GUO Runhua, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Indentation of North China Block into Greater South China Block and Indosinian Orocline[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 171-184.]
- [22] Niu Y L, O'Hara M J, Pearce J A. Initiation of subduction zones as a consequence of lateral compositional buoyancy contrast within the lithosphere: a petrological perspective[J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(5): 851-886.
- [23] Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. Evolution of the western Pacific and its margin[J]. *Tectonophysics*, 1977, 38(1-2): 145-152, 155-165.
- [24] Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the West Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3-4): 533-542.
- [25] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3-4): 212-270.
- [26] Kinoshita O. Possible manifestations of slab window magmatisms in Cretaceous southwest Japan[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344(1-2): 1-13.
- [27] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236-244. [ZHANG Qi, WANG Yan, QIAN Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 236-244.]
- [28] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1404-1430. [ZHANG Qi, WANG Yuanlong, JIN Weijun, et al. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: evidence, problems and implication[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1404-1430.]
- [29] Taylor B, Martinez F. Back-arc basin basalt systematics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(3-4): 481-497.
- [30] Liu B, Li S Z, Suo Y H, et al. The geological nature and geodynamics of the Okinawa Trough, western Pacific[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 416-428.
- [31] 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2602-2618. [SUO Yanhui, LI Sanzhong, DAI Liming, et al. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2602-2618.]
- [32] 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 65-94. [LI Sanzhong, YU Shan, ZHAO Shujuan, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental margin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 65-94.]
- [33] McAdoo D C, Sandwell D T. Folding of oceanic lithosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(B10): 8563-8569.
- [34] Cloetingh S, Wortel R. Stress in the Indo-Australian plate

- [J]. *Tectonophysics*, 1986, 132(1-3): 49-67.
- [35] Maruyama S. Plume tectonics[J]. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 1994, 100(1): 24-49.
- [36] Yang Y T. An unrecognized major collision of the Okhotsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126: 96-115.
- [37] 王鹏程, 赵淑娟, 李三忠, 等. 长江中下游南部逆冲变形样式及其机制[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 230-244. [WANG Pengcheng, ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, et al. The styles and dynamics of thrust in the south of the Middle-Lower Yangtze River area, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 230-244.]
- [38] Replumaz A, Capitanio F A, Guillot S, et al. The coupling of Indian subduction and Asian continental tectonics [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 608-626.
- [39] Gibbons A D, Zahirovic S, Müller R D, et al. Tectonic model reconciling evidence for the collisions between India, Eurasia and intra-oceanic arcs of the central-eastern Tethys [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 451-492.
- [40] Zahirovic S, Müller R D, Seton M, et al. Tectonic speed limits from plate kinematic reconstructions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 418: 40-52.
- [41] Zahirovic S, Matthews K J, Flament N, et al. Tectonic evolution and deep mantle structure of the eastern Tethys since the latest Jurassic[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 162: 293-337.
- [42] Davies G F. *Mantle Convection for Geologists*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [43] Van Orman J, Cochran J R, Weissel J K, et al. Distribution of shortening between the Indian and Australian plates in the central Indian Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133(1-2): 35-46.
- [44] Bull J M, Scrutton R A. Fault reactivation in the central Indian Ocean and the rheology of oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 344(6269): 855-858.
- [45] Royer J Y, Sandwell D T. Evolution of the eastern Indian Ocean since the Late Cretaceous: constraints from Geosat altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B10): 13755-13782.
- [46] Delescluse M, Montési L G J, Chamot-Rooke N. Fault reactivation and selective abandonment in the oceanic lithosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): L16312.
- [47] Chamot-Rooke N, Jestin F, De Voogd B. Intraplate shortening in the central Indian Ocean determined from a 2100-km-long north-south deep seismic reflection profile[J]. *Geology*, 1993, 21(11): 1043-1046.
- [48] Bull J M, Scrutton R A. Seismic reflection images of intraplate deformation, Central Indian Ocean, and their tectonic significance[J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(6): 955-966.
- [49] Yue H, Lay T, Koper K D. En échelon and orthogonal fault ruptures of the 11 April 2012 great intraplate earthquakes [J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 245-249.
- [50] Meng L, Ampuero J P, Stock J, et al. Earthquake in a maze: compressional rupture branching during the 2012 M_w 8.6 Sumatra earthquake [J]. *Science*, 2012, 337(6095): 724-726.
- [51] 李三忠, 索艳慧, 余珊, 等. 西南印度洋构造地貌与构造过程[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(1): 15-29. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, YU Shan, et al. Morphotectonics and tectonic processes of the Southwest Indian Ocean[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(1): 15-29.]
- [52] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 印度洋构造过程重建与成矿模式: 西南印度洋洋中脊的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(1): 30-43. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Morphotectonics and tectonic processes of the Southwest Indian Ocean[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(1): 30-43.]
- [53] Sager W W, Bull J M, Krishna K S. Active faulting on the Ninetyeast Ridge and its relation to deformation of the Indo-Australian plate[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(8): 4648-4668.
- [54] Honza E, Fujioka K. Formation of arcs and backarc basins inferred from the tectonic evolution of southeast Asia since the Late Cretaceous[J]. *Tectonophysics*, 2004, 384(1-4): 23-53.
- [55] 秦蕴珊, 尹宏. 西太平洋——我国深海科学研究的优先战略选区[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 245-248. [QIN Yunshan, YIN Hong. Western Pacific: The strategic priority in China deep-sea research [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 245-248.]

WEST PACIFIC AND NORTH INDIAN OCEANS AND THEIR OCEAN-CONTINENT CONNECTION ZONES: EVOLUTION AND DEBATES

ZHANG Guowei^{1,2,3}, LI Sanzhong^{2,3}

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: The Indian Ocean and the West Pacific Ocean as well as the ocean-continent connection zones in

between constitute the core of "The Belt and Road" Program. In-depth scientific understanding of the natural environment, mineral resources, geo-hazard distribution, energy potential and other geoscientific problems of the region is critical for the earth science communities to well serve the urgent needs of the region. This paper mainly discusses the following key scientific issues in the West Pacific and North Indian oceans and their connection zones: 1, modern marine geodynamic problems related to the two oceans. Based on the research and development needs in the two oceans and the ocean-continent transitional zones, this item includes the following questions: (1) origin, growth, death and evolution of plates involving the two oceans, for example, ① the initial origin and process of the triangle Pacific Plate, including the origin and difference of the Galapagos and West Shatsky micro-plates; ② spatial and temporal evolution, current status and future trends of the plates in the paleo- or present Pacific Ocean and their impacts on the evolution of the East Asian Continent Domain; ③ origin and evolution of the Indian Ocean and the formation and break of related supercontinents. (2) the latest progress in the research of mid-oceanic ridges and related problems: ① the ridge- hotspot interaction and ridge accretion, the relationship between vertical accretion behavior in scales of thousands years or tens of thousands years and lateral spreading in scale of millions years at the mid-oceanic ridges aged 0 Ma; ② differences in the formation mechanisms between back-arc basin extension and normal mid-oceanic ridge spreading; ③ differences between the spreading of ultra-slow Indian Ocean and rapid Pacific, differences between active and passive spreading, and the push force onto the mid-oceanic ridges; ④ mid-oceanic ridge jumping and spreading termination: causes of the intra-oceanic plate reorganization, termination, and spatial jumps; ⑤ the interaction between mantle plume and mid-oceanic ridge. (3) intra-oceanic subduction and tectonics: ① the origin of intra-oceanic arc and subduction, ridge subduction and slab windows at continental margins, transform faults and transform-type continental margin; ② origins of large igneous provinces, oceanic plateaus and seamounts chains. (4) oceanic core complex and rheology of oceanic crusts in the Indian Ocean. (5) research advances in the driving force within oceanic plates, including mantle convection, negative buoyancy, trench suction and mid-oceanic ridge push etc. 2, ocean-continent connection zones between the two oceans, including: (1) properties of continental margin basement, for example, if the crusts of the Okinawa Trough, the Okhotsk Sea, and east of New Zealand are continental crust or oceanic crust, and the origin of micro-continent in oceans; (2) the process of ocean-continent transition and coupling, comparison of major events between the West Pacific Ocean seamount chains and continental margins, mantle exhumation and the ocean-continent transition zones, origins of transform fault within backarc basins, formation and subduction of transform-type continental margins; (3) strike-slip faulting between the West Pacific Ocean and the East Asian Continent and its temporal and spatial range and scale; (4) connection between deep and surface processes within the two oceans and their connection zones, namely the assembly among the Eurasian, Pacific and India-Australia plates and the related effect from the deep mantle, lithosphere, to crust and surface Earth system, and some related issues within the connection zones of the two oceans under the super-convergent background. 3, relationship, especially their present relationship among the Paleo- or Present Pacific plates, the Tethyan Belt, the Eurasian Plate or the plates within the Indian Ocean and their evolutionary trends. At last, this paper makes a perspective on the development of marine geology in the two oceans and one zone.

Key words: ocean-continent connection zone; marine geodynamics; Belt and Road; India Ocean; West Pacific Ocean