

晚中生代以来太平洋域板块过程及其对东亚陆缘构造研究的启示

周蒂, 孙珍

中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室(南海海洋研究所), 广东 广州 510301

摘要: 晚中生代以来太平洋构造域的地质过程明显影响了东亚陆缘的构造演化、岩浆活动和成矿过程, 加强对太平洋板块自身演化过程的认识是我们正确理解东亚陆缘构造变迁的基础。文章从太平洋域与特提斯域地质过程对比、古太平洋演化的重要事件和扩张脊俯冲三个方面简要介绍古—今太平洋的构造演化的研究成果, 特别是最新成果, 分析晚中生代以来太平洋域构造演化对东亚陆缘的可能影响, 以期引起学界对开展有关洋陆结合研究的重视, 并提供一份快速参考资料。

关键词: 太平洋; 东亚陆缘; 晚中生代以来; 板块过程; 构造事件; 扩张脊俯冲

中图分类号: P736.122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2017)03-0001-19

Plate evolution in the Pacific domain since Late Mesozoic and its inspiration to tectonic research of East Asia margin

ZHOU Di, SUN Zhen

CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

Abstract: Since the Late Mesozoic, the plate evolution in the Pacific domain has influenced the tectonic evolution, magmatism and mineralization of the East Asia margin. Improving our knowledge about the Pacific evolution will benefit our understanding of the tectonic evolution of East Asia continental margin. In this paper, we summarize updated research results on the tectonic evolution of the paleo and present Pacific Ocean from three aspects, the distinction between Pacific and Tethys tectonic domains, important tectonic events during Pacific evolution and the ridge subduction around the Pacific. Possible effects of Pacific domain on the evolution of East Asia continental margin are probed. Our aim is to call on more intensified research on Asia continent and Pacific Ocean, and to provide an easy reference for such research.

Key words: Pacific, East Asia continental margin, Late Mesozoic, plate tectonics, tectonic event, ridge subduction

本文的“太平洋域”指现今太平洋海水所波及的区域, 其构造演化历史不仅包括太平洋板块, 也包括地质历史时期曾存在于该区域的其他一些板块的演化历史。本文的“东亚陆缘”指亚洲大陆的印支半岛、华南、华东以及西南日本一带, 以及毗连的大陆架区域、东海、南海、加里曼丹岛和印尼群岛。东亚陆缘位于欧亚大陆的东南缘, 被两个大洋所挟

持, 向东是菲律宾海和广阔的太平洋, 向南邻接印度洋。从板块构造的角度来看, 东亚陆缘毗邻地球上两大超级汇聚带——环太平洋汇聚带和特提斯汇聚带——的交汇处。东亚陆缘的构造演化必然受这两大构造域的地质过程所影响。

在过去相当长一段时间内, 对特提斯构造域的研究取得了长足的进展, 对特提斯洋的多期、多岛

收稿日期: 2016-09-30; 修订日期: 2016-12-21。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金委员会—广东省联合基金项目(U1301233)

作者简介: 周蒂(1944—), 女, 博士, 研究员。主要从事海洋地质与模拟研究。E-mail: zhoudiscs@scsio.ac.cn

Received date: 2016-09-30; **Revised date:** 2016-12-21. **Editor:** YIN Bo

Foundation item: Joint Program of National Natural Science Foundation of China and Guangdong Province (U1301233)

Corresponding author: ZHOU Di. E-mail: zhoudiscs@scsio.ac.cn

演化历史有了越来越清晰的认识,尤其是对印度板块挤入欧亚大陆以及青藏高原隆升历史的研究,导致东亚陆缘板内大规模构造逃逸模式的提出(Tapponnier et al, 1982; Tappoonier et al, 1986),揭示了特提斯构造域的汇聚有可能对东亚陆缘构造产生巨大影响,为解释诸如南海的张开(Briais et al, 1993)、菲律宾海地幔的 Dupal 地球化学异常(Flower et al, 1998)等东亚陆缘构造演化的地球动力学问题提供了新的思路 and 重要依据。

相比之下,对太平洋和环太平洋构造域演化历史的研究则困难得多,主要是因为太平洋的西、北和东三侧都在发生俯冲,大量洋壳已消失在地球深处。尽管如此,随着科学技术的进步,地质地球物理学家们依靠陆缘和洋岛地质分析、洋底钻探采样、大洋磁条带识别对比、地震层析成像等多种手段来积累资料,并在此基础上进行全球或区域尺度的板块运动学模拟,还是揭示了太平洋从中中生代(约 200Ma)以来构造演化的许多基本特征,提出了一些构造重建模型,识别了一些重要构造事件(Engelbreton et al, 1985; Nakanishi et al, 1989; Maruyama et al, 1997; Müller et al, 2008; Wessel et al, 2008; Matthews et al, 2012; Seton et al, 2012),对一些太平洋构造域的特殊构造(如洋脊俯冲、火山岛链、大火山岩省等)进行了深入的研究(Thorkelson, 1996; Koppers et al, 2001; Thorkelson et al, 2005; Seton et al, 2015; Sager et al, 2016),也对太平洋地质过程与东亚陆缘构造演化的关系进行了一些探讨(Li et al, 2007; Sun et al, 2007、2010; 朱日祥等, 2012; Jiang et al, 2015)。

基于东亚陆缘构造研究不能仅考虑特提斯域的影响,还应该考虑太平洋域的影响这一基本认识,本文综述对晚中生代以来太平洋域构造演化的三方面主要成果(基本特征、重大构造事件、洋脊俯冲),分析其对东亚陆缘构造研究的可能启示,并讨论进一步研究需要解决的难点问题。

1 现今太平洋的板块构造特征

现今太平洋(图 1)是地球上最大的大洋,面积约 1.7 亿平方千米,占地球表面面积的 1/3。太平洋的周围有亚洲、澳洲、南极洲、南美洲和北美洲这五大洲,除在南面与南极洲板块之间以正在扩张的洋脊分隔之外,在西、北、东三面都被汇聚边缘所围限,发生太平洋向周边陆块或岛弧的俯冲。太平洋内部由多个大洋板块组成,即太平洋(Pacific)、纳

兹卡(Nazca)、科科斯(Cocos)、胡安-德富卡(Juan de Fuca)等洋块和若干微洋块;这些洋块之间由洋脊或转换断层所分隔。太平洋内还有许多火山岛链和海台,多数被认为是地幔柱的表现或遗迹(O'Connor et al, 2013; Whittaker et al, 2015)。根据大洋磁条带的辨识和大洋钻探的证实,今日太平洋洋壳的年龄极不对称(图 2): 最老洋壳在靠近太平洋西部边缘的大洋钻探计划(ODP)站位 801c 附近,根据磁条带推算年龄约为 190Ma (Seton et al, 2012);而最新的(0Ma)洋壳在偏东部,沿东太平洋洋脊分布,那里是现今地球上扩张速率最高的活动洋脊。

2 古太平洋构造演化的回溯

2.1 回溯方法和依据

古太平洋即泛大洋(Panthalassa),其大部分已经俯冲潜没到周边陆块之下,因此古太平洋构造演化的回溯方法是在实际观测资料的基础上进行定性回溯和计算机模拟。回溯所依据的观测资料主要有 4 个方面:大洋磁条带、洋底钻探采样、陆缘和海山的地质分析、地震层析成像。通过大洋磁条带的识别和对比揭示出洋壳的年龄分布和扩张脊、转换断层的配置,这些认识得到了洋底钻探的验证、修正和补充,成为回溯古太平洋演化的基本依据。基于洋底扩张的对称性特征,还可以外推已被俯冲潜没的那部分洋壳,而地震层析成像则被用于验证、修正和补充对已俯冲掉的那部分洋壳的推测。在太平洋内有千余海山,其中有大量地幔柱成因的大火山岩省和火山岛链,虽然有证据表明热点的位置也会变化,但研究表明热点间的相对运动不会超过板块运动的 5% (Wessel et al, 2008),所以还是可以用作作为板块运动的参照系,大火山岩省和火山岛链的研究成为推测板块相对于热点参照系的漂移的基本依据。陆缘和俯冲带研究提供了有关俯冲洋壳的组成、年龄和俯冲历史的丰富信息,尤其在俯冲带的增生杂岩中还有可能蕴含非常老的、在现代洋壳中找不到其对偶部分(故不可能根据磁条带外推)的已俯冲洋壳的信息。综合利用上述资料,结合大洋和大陆的古地磁、卫星重力和其他地形、地质、地球物理、地球化学资料,定性或借助于计算机模拟手段来进行板块构造重建,力求获得能拟合尽可能多的观测资料的、全球协调的板块演化模型。

虽然在日本西南部和冲绳群岛的俯冲增生杂岩的记录表明古太平洋的洋壳年龄至少可回溯到晚石

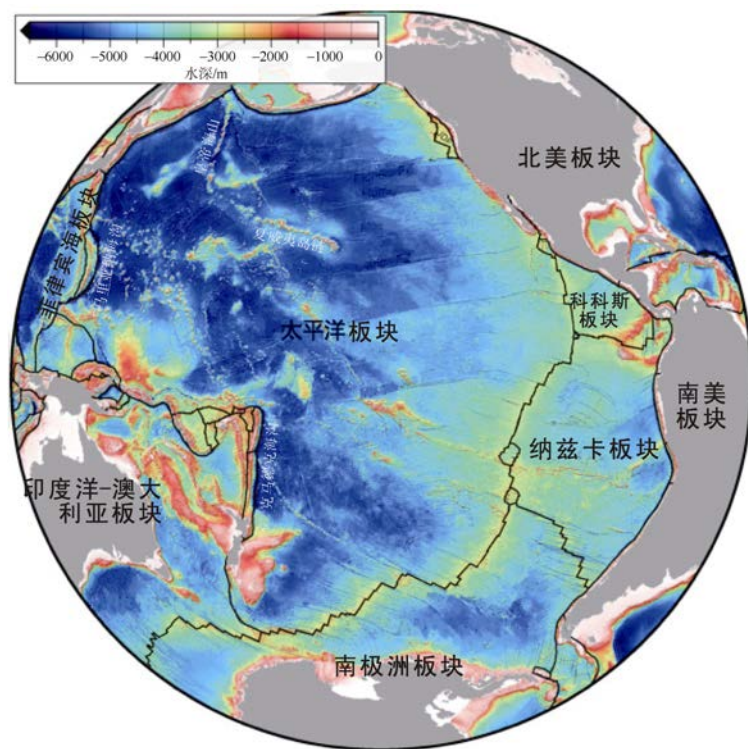


图 1 太平洋地形图[源自 Wright 等(2016)]
黑色实线表示板块边界
Fig. 1 Topographic map of the Pacific Ocean. After Wright et al (2016)

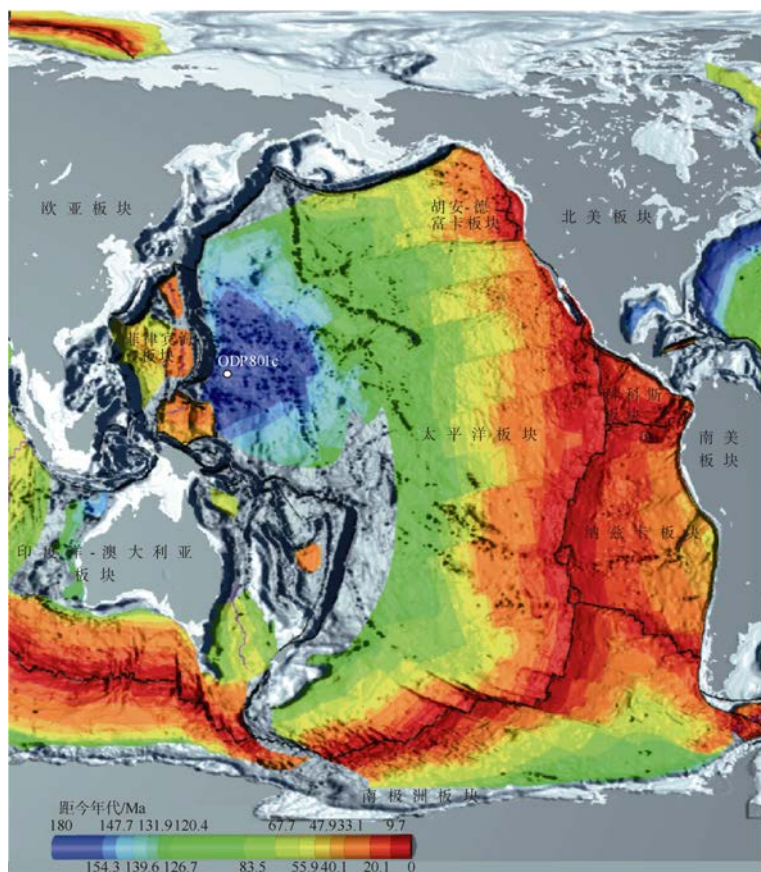


图 2 太平洋洋底年龄图(截自 <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/images/g01167-pos-a0001.pdf>)
黑色实线表示板块边界；白色圆点示 ODP801c 站位
Fig. 2 Seafloor age of the Pacific Ocean

炭世(Isozaki et al, 1988; Maruyama et al, 1997),但是在太平洋内,根据大洋钻探和磁条带推算的最老洋壳年龄约为 190Ma,所以目前的古太平洋构造重建主要集中于中中生代 200Ma 以来(Engebretson et al, 1985; Wessel et al, 2006; Müller et al, 2008; Seton et al, 2012; Wright et al, 2016)。

回溯古太平洋演化是一个非常困难的任务,由于观测、采样和研究方法的局限性,更由于古太平洋演化本身的复杂性,目前的数据、认识和模式都有很大的不确定性,时代越老,不确定性越大。本文在以下的章节中将不再逐一指出不确定性问题,对有不同观点的问题一般将沿用较为广泛接受的观点,特此说明。

2.2 库拉板块问题

在有关古太平洋演化的历史文献中,“库拉板块”(Kula Plate)这个名词的应用发生了重大变化,需要特别留意。在现今太平洋的西北部可见到方向不同的 4 组磁条带(图 3): NE—SW 向的日本磁条带、NW—SE 向的夏威夷磁条带、NEE—SWW 走向的菲尼克斯磁条带、以及近 E—W 走向的库拉磁条带。在早期影响很大的古太平洋演化模式中(Hilde et al, 1977),将日本磁条带与库拉磁条带作为同一磁条带

系统,代表已俯冲潜没的库拉板块的对偶部分。所以该模式认为太平洋大约在 190Ma 诞生于库拉—法拉隆—菲尼克斯三大板块的三联点处(图 4a),在太平洋扩张的同时,库拉板块不断向欧亚大陆俯冲,到约 100Ma 时已差不多俯冲殆尽,只剩东段(即库拉磁条带指示的那段)继续向阿留申岛弧俯冲(图 4b)。这个模式被许多文献采用,影响很大。但是,后来的研究认为原来的所谓“库拉板块”实际是两个板块,西部是由日本磁条带(M33~M0, 约 158~120Ma)所指示“依扎奈崎板块”,东部是由库拉磁条带(C33~C21, 约 83~47Ma)所指示的“库拉板块”(图 3)。太平洋板块约 190Ma 诞生于依扎奈崎—法拉隆—菲尼克斯三大板块的三联点处,而库拉板块约 80Ma 从法拉隆板块分裂出来,约 47Ma 俯冲消亡于阿留申岛弧之下(Woode et al, 1982; Engebretson et al, 1985; Sager et al, 1988; Nakanishi et al, 1989)。这后一种模式现在已经被广泛接受,但在某些文献(如上世纪 90 年代的文献)中还是存在混淆,需要在阅读时注意鉴别。

3 太平洋域与特提斯域地质过程对比

由于东亚陆缘邻近太平洋构造域与特提斯构造

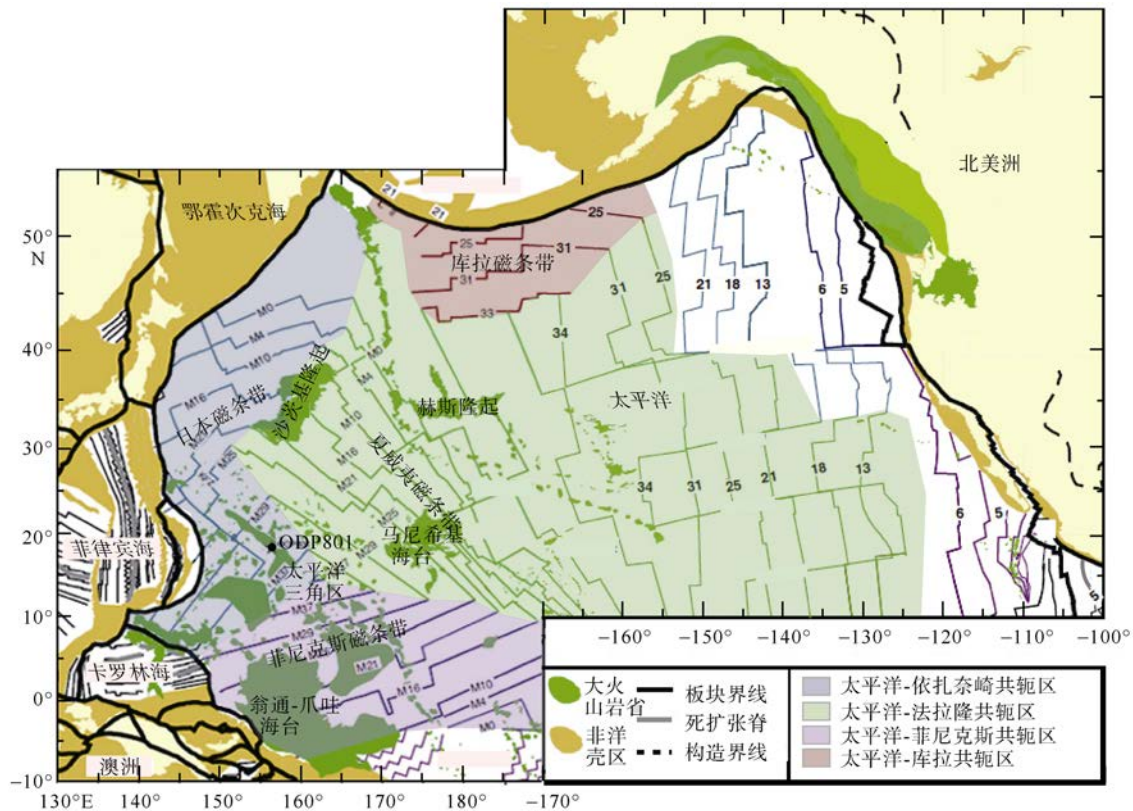


图 3 西北太平洋磁条带简图[据 Seton 等(2012)编辑译注]

图中数字表示磁条带编号。本文作者注:图中太平洋三角区的磁条带编号有误: ODP801 站位(五角星)处的磁条带应为 M42

Fig. 3 Magnetic anomalies in the northwestern Pacific Ocean. After Seton et al (2012)

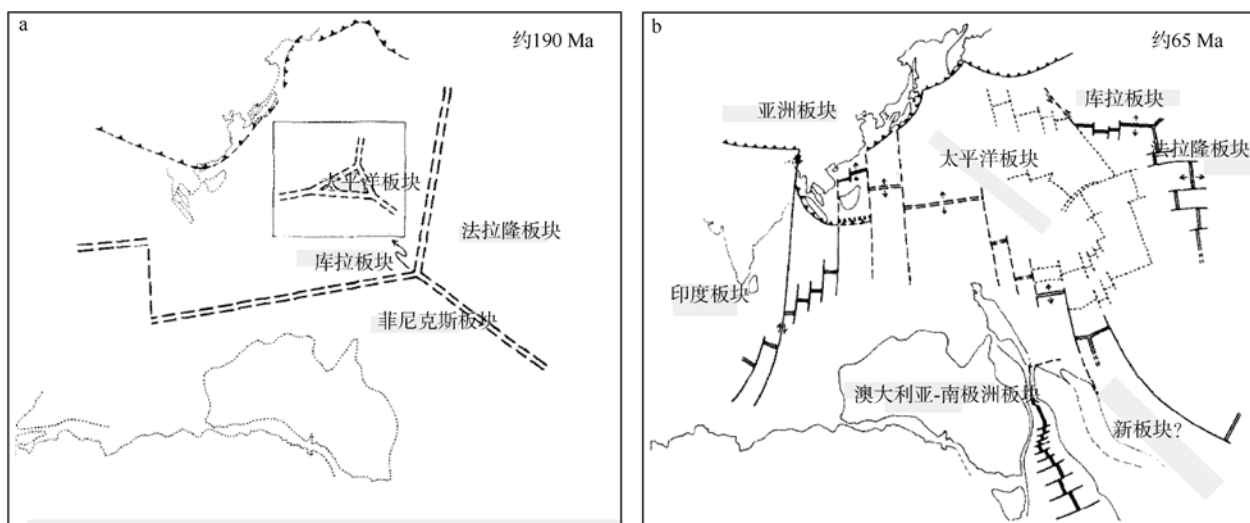


图4 早期的太平洋演化模式图[译自 Hilde 等(1977)]

a. 约 190Ma 时, 太平洋诞生于库拉—法拉隆—菲尼克斯三大板块的三联点处; b. 图 a 方框位置。约 65Ma 时, 库拉板块西段已基本俯冲潜没, 而东段尚继续扩张并向北俯冲。后期的研究认为所谓“库拉板块西段”应该是另一个板块, 称为“依扎奈崎板块”(Sager et al, 1988; Nakanishi et al, 1989)。黑色实线和虚线表示扩张脊; 单虚线表示转换断层; 齿线表示俯冲带; 灰色实、虚细线表示陆、岛边界

Fig. 4 Early evolution of the Pacific Ocean. After Hilde et al (1977)

域的交汇处, 东亚陆缘的地质演化受到两大构造域地质过程的影响, 这是很容易理解的。但是, 为了识别哪些是太平洋构造域的影响哪些是特提斯构造域的影响, 就需要明确这两大构造域的地质过程有什么特征和如何区别。

3.1 古太平洋构造演化的基本特征

至今对古太平洋在晚中生代以来演化历史的研究尚未获得完全一致的模式, 但对一些主要特征还是达到了基本共识。图 5 简明地显示了古太平洋内多个洋块的生成、漂移和消亡的历史, 包括一些现今太平洋中已不存在的板块, 如已经完全俯冲潜没的依扎奈崎(Izanagi)和库拉(Kula)板块, 以及已分离成若干新板块的法拉隆(Farallon)和菲尼克斯(Phoenix)板块。古太平洋的构造演化和地质过程具有以下基本特征:

1) 古太平洋是一个长期发育(至少 200 百万年)的开阔大洋, 是由多个大洋壳板块组成的、没有陆块的“干净”大洋。

2) 古太平洋的周缘除东南缘以外都被俯冲带环绕; 仅晚中生代时在西缘有个“缺口”, 使古太平洋与特提斯的东段的“喇叭口”连通。

3) 古太平洋的基本地质过程是: 在洋内, 发生大洋板块的新生、扩张、洋洋俯冲、板块运动的重组。洋内还有活跃的地幔柱活动, 形成大火山岩省和火山岛链。在周缘, 发生古太平洋向周边陆块的俯冲消亡。

3.2 特提斯域构造演化的基本特征

特提斯洋的概念从最初提出到现在已经超过 120 个年头了。经过众多学者的研究, 对特提斯的认识逐步深入, 特提斯的概念也不断发展, 从最初的“地中海特提斯”发展到“海湾特提斯”、“多期特提斯”、“多岛洋特提斯”和“特提斯构造域”。综合国内外特提斯研究者的意见(Şengör, 1989; 陈智梁, 1994; 潘桂棠, 1994; Metcalfe, 1996、2013; 殷鸿福等, 1999), 本文第一作者曾将特提斯域的基本特征总结如下(周蒂等, 2005):

1) 特提斯洋是欧亚(劳亚)和冈瓦纳两个超级陆块之间的低纬度多岛洋, 向东呈喇叭口与古太平洋(泛大洋)相通;

2) 特提斯域的基本地质过程是: 陆块(群)阶段性地从冈瓦纳大陆北缘裂离, 每一次冈瓦纳北缘陆块裂离都在其南部形成新一期特提斯洋, 自晚古生代以来共发育了古、中、新三期特提斯洋。每期特提斯洋在扩张的同时都推着新裂离的陆块(群)向北漂移, 陆块(群)北侧的洋盆则向欧亚大陆持续俯冲, 最终导致陆块(群)与欧亚大陆碰撞拼合和新一期特提斯洋的关闭。

可见, 特提斯域以大量陆块的介入和每期特提斯洋的寿命有限而明显有别于太平洋域。

3.3 太平洋域和特提斯域在东亚陆缘的交接关系

东亚陆缘是欧亚陆块东南岬角, 被特提斯汇聚带与滨太平洋汇聚带挟持, 其构造演化必然会受这两大超级汇聚带的影响。根据 3.1 和 3.2 的分析, 可

知太平洋域的地质过程与特提斯域的地质过程有截然区别,可作为辨识两个构造域在东亚陆缘的影响的基础。

本文作者曾总结晚中生代东亚陆缘的岩相古地理演变,并在此基础上讨论了特提斯域和太平洋域对东亚陆缘的影响(Zhou et al, 2008)。该文指出,在晚中生代东亚陆缘从南面和东面被一个大致“V”形的俯冲增生带所包围,可称为“晚中生代环东亚陆缘俯冲增生带”(图 6)。该带的西段,由苏门答腊南部的沃伊拉(Wyola)、爪哇的卢克乌璐(LukUlo)到加里曼丹岛东南的么拉图斯(Meratus)发育含侏罗纪—白垩纪蛇绿岩套的俯冲增生杂岩,指示了锡库勒、纳塔尔等微陆块向当时组成欧亚板块东南角的巽他陆的拼贴(Barber, 2000; Wakita, 2000),符合特提斯域的特征,因而被认为是中特提斯东延段的遗迹。而在该带的北东段,西南日本和琉球群岛已被证明是至少从石炭纪以来的洋壳发生俯冲增生的结果(Isozaki, 1996; Maruyama et al, 1997),在南海东缘的卡拉棉群岛也发现由洋壳蛇绿岩、放射虫硅质岩、海山碳酸盐岩和海沟碎屑岩组成的“大洋层序”,年龄从二叠纪到白垩纪(Isozaki et al, 1988),这些亿年以上的长期纯洋壳(无陆壳)物质的俯冲增生,明显具有太平洋域的特征。此外,在台湾东北部见有侏罗纪双变质带,在南海东北部的新生界沉积层之下推测有 NE—SW 走向的俯冲带(Zhou et al, 2006),在巴拉望岛见到基质中含中—晚侏罗世放射虫的混杂滑塌沉积和晚白垩世至始新世蛇绿岩(Yumul Jr et al, 2009),在加里曼丹岛东北部有一条近南北走向的蛇绿岩带(Hutchison, 2005),在图 6 中暂称为阿迪欧(Adio)带,这些条带具俯冲增生的某些特征,但组成和时代不太清楚,因其外侧未发现拼贴的陆块,也可能归属太平洋域。

4 太平洋域演化重要事件及对东亚陆缘的可能影响

东亚陆缘在印支运动以后经历了从特提斯域影响到太平洋域影响的转变,在东亚陆缘中生代构造演化的研究中已广泛考虑到古太平洋演化的影响:沿东亚到东亚陆缘分布的燕山期中酸性岩浆活动被认为是由古太平洋俯冲而产生的火山弧(Zhou et al, 2000; Li Sanzhong et al, 2004; Li Zhengxiang et al, 2007, 2012; Li Zhen et al, 2014; Zhang et al, 2009; Xu et al, 2012; Liu et al, 2014); 西南日本的多条构造带被认为是古太平洋的多期俯冲增生带(Mizutani et al, 1991; Taira et al, 1991); 依扎奈崎和太平洋俯冲方

向、速率和角度的变化对火山弧、增生带的发育产生了重大影响(Isozaki, 1996; Maruyama et al, 1997); 而通过对火山弧、增生带的组成、构造和演化的研究不仅揭示了古太平洋向欧亚大陆俯冲的时空变化特征,提出了若干包含平板俯冲、俯冲带后撤等机理的古太平洋俯冲模式,并且为认识东亚陆缘及古太平洋的构造演化提供了重要基础依据(Engebretson et al, 1984; Zhou et al, 1995, 2000; Maruyama et al, 1997; Li et al, 2007)。本节不再回顾上述研究,而是根据一些较新的研究成果,简述200Ma以来古太平洋演化的若干重要事件,力求为东亚陆缘构造演化的研究提供一些补充信息。

4.1 太平洋域演化的重要事件

4.1.1 太平洋板块诞生(约 190Ma)

迄今全球大洋内所保存的最老洋壳是中—晚侏罗纪洋壳,仅见于西太平洋,位于由日本、夏威夷、菲尼克斯三组磁条带的 M29 (约 157Ma)所围限的“太平洋三角区”内。该区的磁条带幅度低且变化频繁,被称为“侏罗纪磁静带”,但近年来通过深拖磁测方法陆续鉴别出更老的磁条带,最老为 M45,年龄 169.7Ma (Tominaga, 2008)。

太平洋三角区内钻遇的最老洋壳位于 ODP801c 站(18°38'32"N, 156°21'34"E),年龄为 167.7 ± 1.4 Ma, 对应于磁条带 M42 (图 3)(Koppers et al, 2003)。该站离太平洋三角区中心的距离为约 750km,按匀速扩张推算,太平洋三角区中心的年龄约为 190Ma,这也就是太平洋最老洋壳的年龄,亦即太平洋板块在依扎奈崎—法拉隆—菲尼克斯三联点处诞生的时代(Seton et al, 2012)。有趣的是,这个采用 21 世纪初最先进的技术获得的太平洋年龄与 30 多年前根据有限磁条带资料所推测的年龄(Hilde et al, 1977)完全一致。

4.1.2 侏罗纪/白垩纪之交事件(约 147~143Ma)

本期事件的特点是板块构造重组和沙茨基(Shatsky)隆起的产生。沙茨基隆起位于太平洋西北部,是 SW—NE 向延伸、面积达 53 万平方公里、主要由大规模席状玄武岩熔岩流和枕状玄武岩组成的大火山岩省(图 7)。这是少有的一个不发育于磁静时期、因而能在内部观测到清晰的磁条带的大火山岩省,由南西向北东识别出从 M21 到 M4 (145Ma 到 125Ma)的磁条带,沙茨基隆起沿日本磁条带向夏威夷磁条带的转折点(称为磁湾, magnetic bight)延伸(Sager et al, 1988; Nakanishi et al, 1999; Sager et al, 2011)。在大洋钻探的 6 个站位测得沙茨基隆起玄武岩年龄 145~134Ma, 向东北方向变新,与磁条带年龄一致(Sager et al, 2015); 岩石成分以类似于洋中

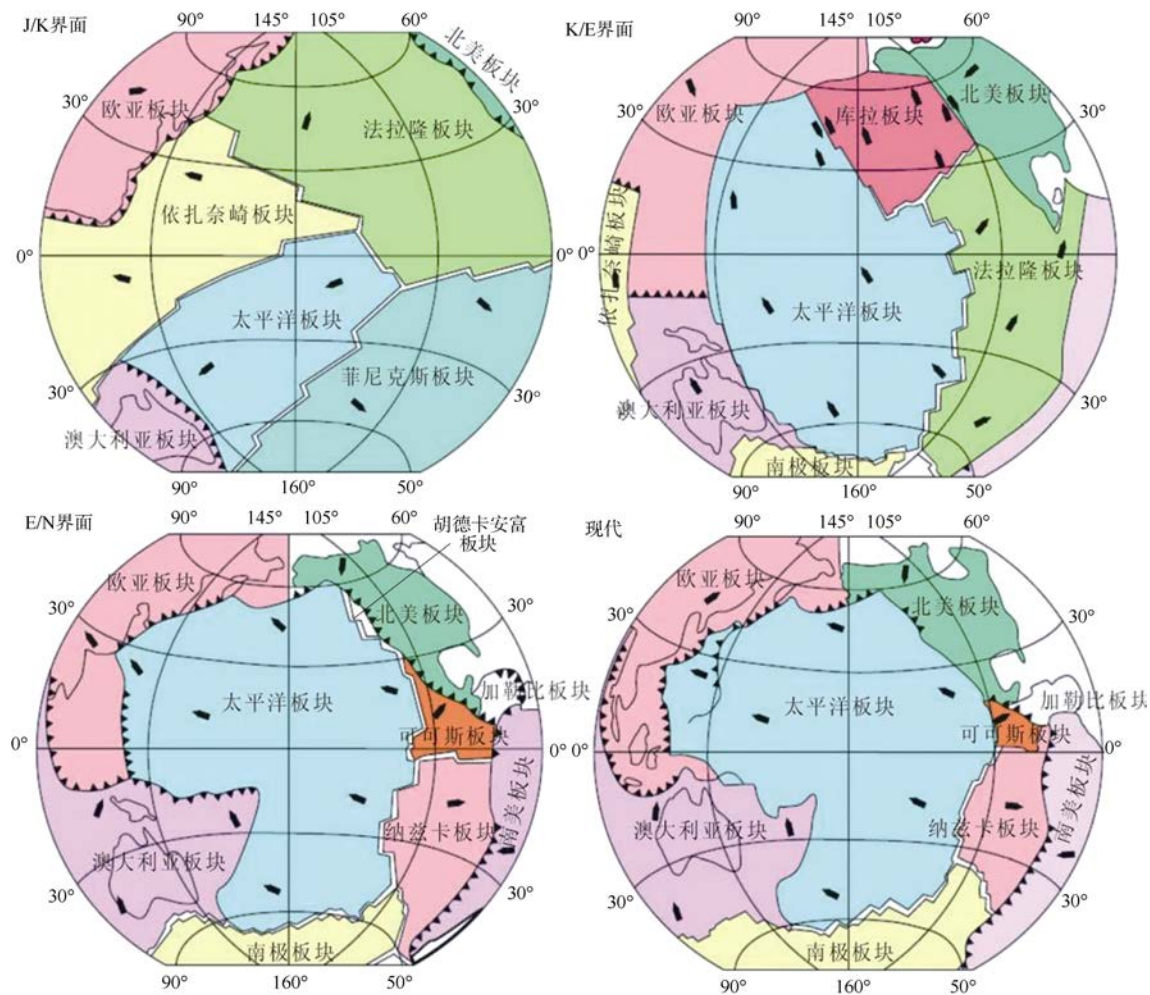


图 5 古太平洋板块演化简图[转译自万天丰(2007)]
双线表示扩张洋脊；齿线表示俯冲带；箭头表示板块漂移方向
Fig. 5 Evolution of the Paleopacific Ocean. After Wan (2007)

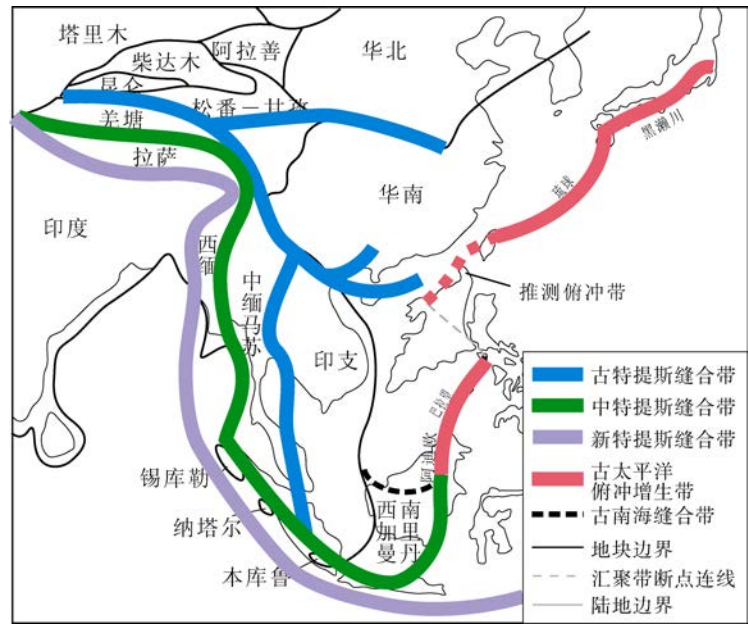


图 6 特提斯域和太平洋域古汇聚带在东南亚的展布示意图[据 Zhou 等(2008)修改]
在晚侏罗世到白垩纪期间，东南亚边缘被俯冲增生带环绕，西段为中特提斯缝合带，东段为古太平洋俯冲增生带
Fig. 6 Sketch map showing the locations of paleo convergent belts of Tethyan and Pacific domains. After Zhou et al (2008)

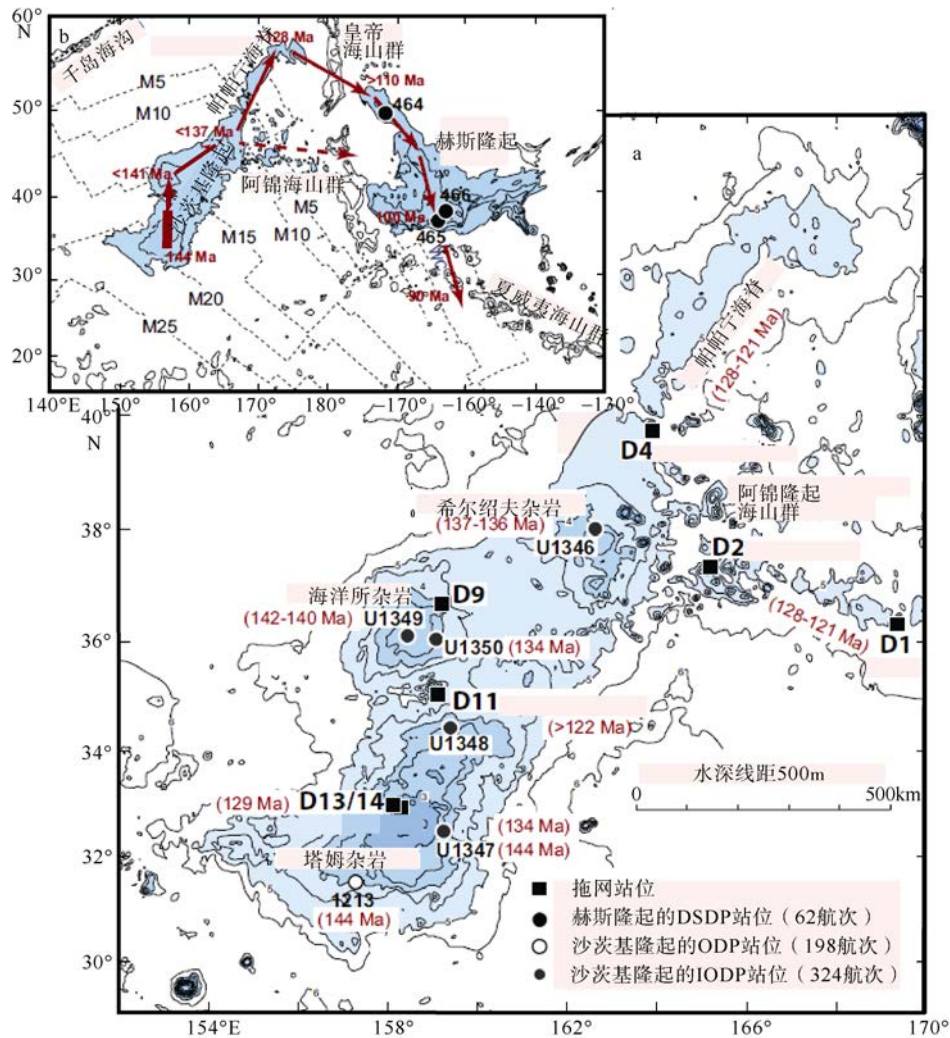


图 7 沙茨基隆起的水深、样品位置和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄图(a)和沙茨基隆起和赫斯隆起的区域位置和磁条带展布图(b) [译自 Tejada 等(2016)]

图 b 中虚线及注释表示磁条带及其编号, 红色箭头和数字显示推测的热点轨迹及相应的年龄, 可见约 128Ma 左右热点轨迹发生了约 90°的转折

Fig. 7 The map of bathymetry, sampling sites and ages of the Shatsky Rise (a), and the map of locations and magnetic anomalies of the Shatsky and Hess rises. After Tejada et al (2016)

脊玄武岩(MORB)的拉斑玄武岩为主, 也有具洋岛玄武岩(OIB)特征和再循环俯冲物质富集地幔信息的高钛类型和其他类型的玄武岩(Heydolph et al, 2014)。地壳结构为增厚的洋壳, 最大厚度可达约 30km (Zhang et al, 2016)。

关于沙茨基隆起的成因, 多数研究者支持热地幔柱模式, 依据是从 SW 向 NE 火山活动的年龄变新, 熔岩的总量和喷发速率降低, 成分复杂性增高, 这些特点都显示地幔柱由柱头向柱尾衰减的趋势, 而且同位素成分指示早期亏损地幔和较高的部分熔融 (Nakanishi et al, 1999; Korenaga et al, 2012; Heydolph et al, 2014)。但火山岩沿依扎奈崎—法拉隆—太平洋三联点的分布、火山活动时期稍长、引起的抬升不大等特点又与经典的地幔柱模式不符, 因此也有人提出了富集地幔沿张裂带侵位的“板块

模式”(Foulger, 2007; Anderson et al, 2014), 或者地幔柱和板块张裂带联合作用的混合模式(Sager et al, 2016)。

在沙茨基隆起形成之前不久即 M23~M22 (153~151Ma) 期间发生了板块构造重组, 由日本磁条带所指示的依扎奈崎—太平洋扩张方向顺时针旋转了 24°, 依扎奈崎—法拉隆—太平洋三联点亦向东跃迁约 800km, 在三联点的新位置发生了沙茨基火山岩的大规模侵位, 因此后者可能与板块构造重组事件受同一应力场变化的影响(Sager et al, 2016)。

4.1.3 早白垩世阿普特(Aptian)期事件(约 125Ma)

本期发生了 3 个重大事件: 西南太平洋超级火山岩省形成; 板块之间的扩张速率显著增大; 太平洋板块的漂移方向显著顺时针旋转。

这一事件的最重要表现是在西南太平洋翁通爪

哇(Ontong Java)、马尼希基(Manihiki)和希库朗伊(Hikurangi) 3 个大火山岩省的形成。这 3 个大火山岩省彼此距离超过 2000km, 却具有相同的演化历史(形成年龄 125~119Ma, 在 20~40Ma 之后发生二次喷发)、类似的岩石和地球化学特征[拉斑质似岛弧型玄武岩、亏损程度低于 MORB、平坦的 REE (稀土元素)等]、类似的地壳速度结构(正常洋壳厚度的 2~5 倍)和侵位深度(水深 1~2.6km), 因而被认为原属同一超级火山岩省, 后因张裂和海底扩张而分离(Taylor, 2006)。这个超级火山岩省被称为翁通爪哇努依(Ontong Java Nui)(Chandler et al, 2012), 面积达 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约为地球面积的 1%, 代表了 200Ma 以来全球规模最大、最强烈、时间最集中的一次火山喷发事件。地震层析成像显示在翁通爪哇之下有一个地幔低速根, 深度可达 300km, 一般认为该超级火山岩省成因于西太平洋超级地幔柱(Tarduno et al, 1991; Richardson et al, 2000; Taylor, 2006; Timm et al, 2011)。

与此同时, 太平洋、依扎奈崎、法拉隆和菲尼克斯 4 大板块之间的扩张速率显著增大, 被称为“早—中白垩纪扩张幕”, 伴随有边缘海盆的张开, 如北部的加拿大盆地、南部的南忠诚(Loyalty)盆地(Seton et al, 2012)。

本期事件的第三个重要表现是太平洋板块漂移方向突然由向 SW 变到向 NW。前已述及, 沙茨基隆起及其延伸部帕帕宁(Papanin)海脊的火山活动在 145~125Ma 期间向 NE 变新, 指示太平洋板块在此期间相对于热点参照系向 SW 漂移。而在沙茨基隆起以东的赫斯(Hess)隆起, 年龄为 >110Ma 至约 100Ma, 具有与沙茨基隆起相同的火山岩化学和同位素特征, 也被认为是地幔柱成因, 其年龄变新方向却转为向 SE (图 7), 指示太平洋板块在此期间的漂移方向转为 NW, 相对于沙茨基期间顺时针旋转了约 80° (Tejada et al, 2016)(图 8)。

本期事件可能具有全球性质: 印度洋克格伦(Kerguelen)大火山岩省的主体也形成于早阿普特期(119~110Ma)(Coffin et al, 2002), 东亚陆缘的岩浆活动显示华北克拉通破坏在约 120Ma 达到高峰(详见本文 4.2.1 节), 由全球性分布的富有机碳的色里(Selli)层所代表的早白垩世厌氧事件被认为起因于大规模火山喷发带来 CO_2 造成温室环境和海平面上升, 不过这次事件尚未造成生物绝灭(Tarduno et al, 1991)。

4.1.4 白垩世中期事件(约 100Ma)

这也是一个全球性的重大事件, 包括但不限于以下表现(图 9)(Matthews et al, 2012):

1) 古太平洋向东冈瓦纳长期俯冲的终止(约 105~100Ma)。而俯冲终止的原因, 则认为是翁通爪哇努依大火山岩省裂离形成的多条扩张脊向东冈瓦纳海沟俯冲, 越来越年轻的洋壳导致浮力增大而超过板片拖曳力的结果。

2) 大洋板块运动模式的改变, 包括太平洋漂移方向从 SWW 变为 NW, 顺时针旋转约 75° (100~95Ma), 且从此保持大致向北或北西漂移至今(图 8)。澳大利亚—印度、南极洲—印度扩张方向的改变(99Ma), 印度向北漂移加速(90Ma)。大西洋扩张速率的增高, 赤道大西洋的最终打开(约 106~100Ma)。

3) 南美—非洲—南极洲三联点附近的布韦(Bouvet)地幔柱发生喷发(约 100~94Ma), 形成了厄加勒斯(Agulhas)高原、莫德(Maud)隆起和北东佐治亚(NE Georgia)隆起。

4) 汇聚陆缘的构造环境改变, 如: 澳大利亚东部发生抬升剥蚀, 新西兰(101Ma 和 97Ma)及南极洲的马利伯德地(Marie Byrd Land)(约 105~102Ma)从挤压变为拉张环境, 南美西部由弧后拉张变为挤压, 郯庐断裂带发生左行压扭及盆地的反转(100~90Ma), 从西南日本、朝鲜半岛到中国东北的区域性抬升, 以及全球性的上/下白垩统间不整合(98.9Ma)。

对于本期全球性事件的起因, Matthews 等(2012)认为是古太平洋向东冈瓦纳俯冲的终止, 导致了从北到南长 7000 余千米的超大规模俯冲带的消失, 改变了地幔流的通道状况, 从而引起大洋扩张系统和板块运动模式的改变, 沿汇聚带构造环境的改变, 岩石圈应力模式的改变, 以及板内构造形变。

4.1.5 早始新世事件(约 50Ma)

本期最著名的事件是太平洋板块漂移方向发生 45°逆时针旋转, 从向 NNW 漂移转为向 NW 漂移(图 8), 其主要证据是皇帝岛链到夏威夷岛链的走向转折(Hawaii-Emperor Bend, HEB)。由岛链转折的时间所指示的太平洋板块旋转的时间, 过去根据对转折处海山样品进行 K-Ar 测年或全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 全熔测年的结果认为是 43Ma; 21 世纪以来采用更先进的宽束激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法对火山岩的长石和角闪石进行单矿物测年, 给出 HEB 开始时间为 $50 \pm 0.9\text{Ma}$, 持续了约 8Ma (Sharp et al, 2006); 或者 HEB 发生于约 53Ma 至 47Ma (O'Connor et al, 2013)。

模拟结果表明, 与此同时太平洋板块与欧亚板块之间的汇聚速度也开始降低, 由 50Ma 前的约 $100\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 或 $80\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 逐渐降至 43Ma 左右的约 $40\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Engelbreton et al, 1985; Northrup et al, 1995)。

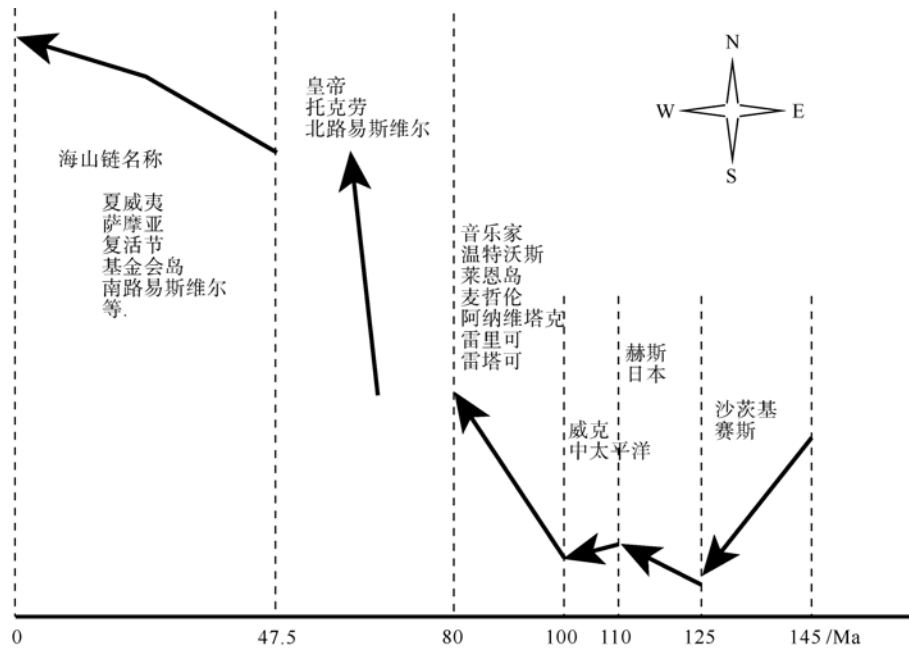


图 8 太平洋板块漂移方向(在固定热点参照系下)随时间的变化示意图[据 Koppers 等(2001)图 1 资料编绘, 但 Emperor/Hawaii 海山链转折时代据 O'Connor 等(2013)]

箭头示漂移方向; 文字示该时代代表性的海山链

Fig. 8 Schematic diagram showing the drift of the Pacific Plate with respect to a fixed hotspot reference frame. Compiled according to Fig. 1 of Koppers et al (2001), but the age of Emperor/Hawaii bend according to O'Connor et al (2013)

HEB 事件与太平洋及其邻域的许多构造事件的年龄一致(图 10), 如在太平洋西缘开始形成两条俯冲带, 2200km 长的伊豆—小笠原—马里亚纳(Izu-Bonin-Mariana)俯冲带(51~48Ma), 以及南半球的长约 2550km 的汤加—克马德克(Tonga-Kermadec)俯冲带, 这可认为是在太平洋漂移方向改变时, 应力场的变化使原先转换断层转变为俯冲带的结果(Seton et al, 2015)。

本期事件在太平洋以外也有表现, 最重要的是印度—欧亚的碰撞, 开始碰撞于约 70Ma 或约 60Ma, 而全面碰撞(海水的消失、高原的形成)则发生于约 50Ma (Yin et al, 2000; Ding et al, 2016)。

4.1.6 中—晚新生代事件

Wessel 等(2008)根据对太平洋内 12 条海山链的时空分布, 回溯了 145Ma 以来的太平洋板块绝对漂移历史(APM), 指出了 4 个重要的漂移方向突变事件, 除了前述事件之外, 还有以下 3 个绝对漂移方向发生小规模变化的事件:

- 1) 28~24Ma 漂移方向突变, 可能与法拉隆板块的破裂有关;
- 2) 17~14Ma 漂移方向突变, 可能与诸如美国西部盆岭省的快速拉张之类的一系列构造事件相关;
- 3) 约 6Ma 漂移方向突变, 可能与板块拆沉、翁通爪哇努依大火山岩省与澳洲的碰撞有关。

该文还发现在 30Ma 后太平洋视磁极漂移(APM)速度明显加快, 但未发现对应的 APM 方向突变。

4.2 对东亚陆缘的可能影响

对东亚陆缘构造演化的研究中, 太平洋域的影响一直是最受关注的因素之一。对中生代以来由于依扎奈崎板块和太平洋板块的俯冲在东亚陆缘产生的构造、岩浆和成矿效应已有很多研究成果, 本节无意综述所有这些成果, 而是在上节讨论的基础上, 聚焦于对太平洋域演化的重要事件本身(或其所代表的全球性事件)的可能影响方面的研究。以下列举若干已有的研究实例。

4.2.1 华北克拉通破坏

华北克拉通是一个形成于 18 亿年前的古老地块(翟明国, 2011), 长期稳定地保持着 180~200km 厚的太古代岩石圈“根”。“华北克拉通破坏”指克拉通整体稳定性的丧失, 表现为晚中生代以来百余公里的岩石圈减薄、地幔性质改变以及大规模韧性变形、岩浆—成矿活动和伸展构造(朱日祥 等, 2011、2012)。

华北克拉通破坏是近年来我国地学界的研究热点之一, 通过国家自然科学基金重大研究计划, 对华北克拉通破坏的时空分布特征、岩石圈和浅部的变化特征, 以及华北克拉通破坏的大地构造背景、动力来源和机制进行了全面的研究。研究计划的重大成果之一是揭示了华北克拉通破坏的主因是古太平洋俯冲所导致的地幔非稳态流动, 即俯冲的古太

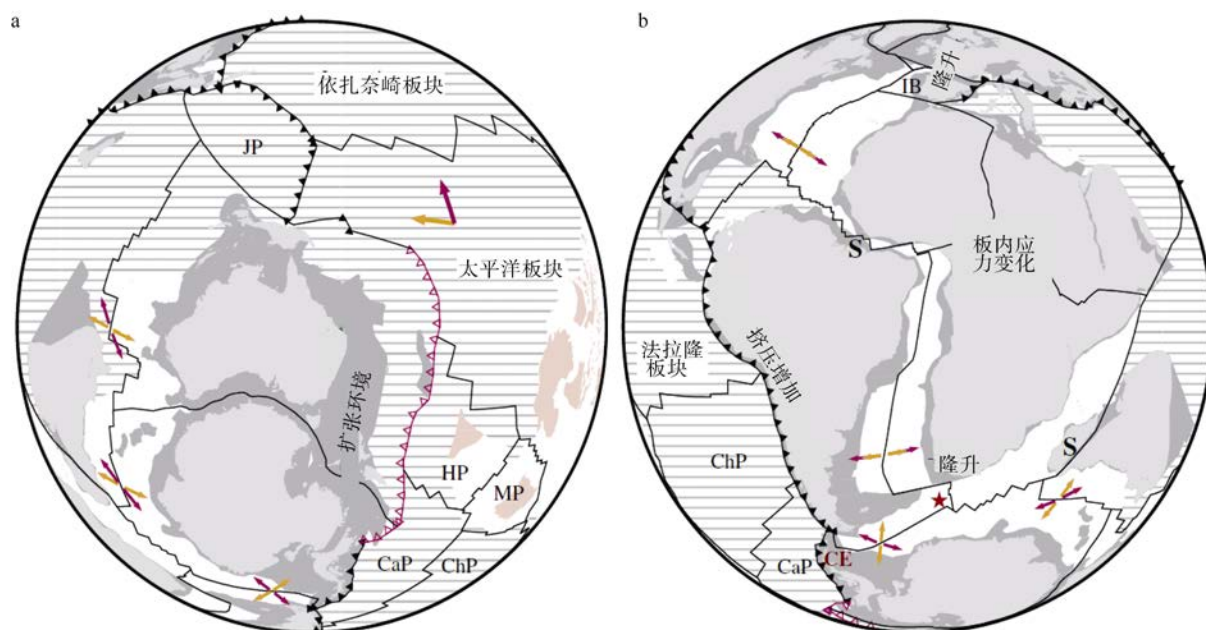


图9 105~100Ma 板块回溯图, 显示当时的主要构造事件[译自 Matthews 等(2012)]

a. 东冈瓦纳区域; b. 大西洋区域。红/橙色箭头分别表示前/后板块运动方向(不按比例); 齿线表示俯冲带, 其中红色段表示当时终止活动的东冈瓦纳俯冲带; 五角星表示布韦(Bouvet)地幔柱位置; 浅灰和深灰色块分别表示陆地和大陆架; 粉色块表示大火山岩省; 横线阴影表示后来被俯冲掉的洋底。S: 海底扩张开始处; CE: 挤压事件发生处; CaP: 卡特奎尔(Catequil)板块; ChP: 查兹卡(Chazca)板块; HP: 希库朗伊(Hikurangi)板块; IB: 伊比利亚(Iberian)板块; JP: 江可申(Junction)板块; MP: 马尼希基(Manihiki)板块

Fig. 9 Plate reconstruction for 105-100 Ma showing major tectonic events. After Matthews et al (2012)

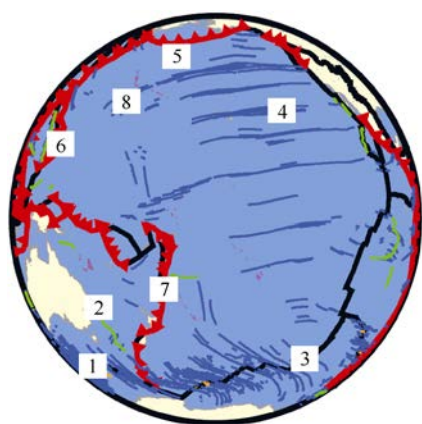


图10 早始新世事件在太平洋及邻域的表现[自 Seton 等(2015)]

1. 澳大利亚—南极扩张方向改变(53~50Ma); 2. 塔斯曼、珊瑚海扩张停止(52Ma); 3. 南太平洋三联点重组(50~48Ma); 4. 法拉隆板块再分裂, 温哥华板块形成(53Ma); 5. 库拉板块扩张方向由SN变为NW—SE (53Ma)和停止扩张(41Ma); 6. 伊豆—小笠原—马里亚纳火山弧开始形成(51~48Ma); 7. 沿汤加—克马德克火山弧的俯冲开始; 8. 夏威夷—皇帝岛链转折及太平洋漂移方向45°逆时针旋转(53~47Ma)。图中黑色粗线表示洋中脊; 红色齿线表示俯冲带; 浅黄色表示陆地; 浅蓝色表示海洋; 深蓝色线表示转换断层; 紫色表示火山岛

Fig. 10 The expressions of the Early Eocene event in the Pacific Ocean and adjacent areas. After Seton et al (2015)

太平洋板块释放的大量水进入华北克拉通东部岩石圈地幔, 导致其强烈水化和弱化, 使华北克拉通东部

地幔对流系统局部失稳, 上覆岩石圈黏滞系数大幅降低, 继而发生拆沉或侵蚀, 使华北克拉通遭受破坏, 同时由于俯冲板片后退中的远场弧后拉张导致了岩石圈强烈伸展。岩石圈减薄在全球其他克拉通中也多有发生, 但大多并不伴随克拉通的破坏; 对华北克拉通破坏的研究表明而只有当受到大洋板块俯冲作用的影响时, 克拉通破坏才有可能发生, 这一发现是对全球构造研究的重大贡献[朱日祥等(2012、2011)及其中引用的有关文献]。

华北克拉通破坏是太平洋域构造过程影响东亚陆缘构造演化的重要实例, 它显示了这种影响可达到的巨大强度和时空深远度。对华北克拉通破坏的研究也为对太平洋域与东亚陆缘构造演化关系研究提供了范例, 告诉我们如何通过地球物理、地球化学、地质学以及各种先进技术方法的密切配合, 来认识从浅部地质构造到深部岩石圈地幔和软流圈过程的地球动力学关系和规律。

将华北克拉通破坏与太平洋域演化进行重要事件对比, 也是分析两者关系的重要依据之一。中国东部晚中生代存在侏罗纪和白垩纪两期岩浆作用, 分别对应于太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲和伸展拉张(Wu et al, 2005)。华北克拉通破坏的峰期时段在约120Ma (周新华, 2006; 吴福元 等, 2008; 朱

光等, 2016)或125Ma (朱日祥等, 2012), 与本文前面讨论过的太平洋域非常重要的早白垩世阿普特期事件同时发生。从白垩纪到早始新世依扎奈崎和太平洋板块漂移方向的顺时针变化与根据郯庐断裂带及沉积盆地所推断的同期华北克拉通东部应力场顺时针变化基本一致(Li Sanzhong et al, 2012; Zhu et al, 2012; 朱光等, 2016)。Sun等(2007)指出, 120~125Ma在中国东部是脉金成矿期, 故他们将这期事件称为“黄金转换”。这些事件的对应关系不仅给华北克拉通破坏与古太平洋俯冲的密切相关提供了有力支持, 而且启示我们需要进一步探讨这种关联的地球系统动力学含义。

4.2.2 应力场和构造变革

太平洋域构造过程对东亚陆缘的影响在华南和东南亚也都有明显的表现。根据对华南褶皱带的岩浆岩测年及构造岩相古地理综合研究, 李正祥和李献华(Li et al, 2007)提出了一个全新的两阶段古太平洋俯冲模式: 第一阶段是从中二叠世(约 265Ma)开始的古太平洋向华南近水平俯冲, 形成北东走向、向内陆推进的大规模逆冲褶皱带和同造山岩浆活动。在约 190Ma 发生俯冲板片的破裂和拆沉, 触发了强烈的 I 型和 A 型岩浆活动, 造山活动终止, 取而代之的是第二阶段的俯冲, 以俯冲板片后滚(roll-back, 由俯冲角度变大而引起)和与之相伴的向海后撤的岩浆活动为特征。值得注意的是, 造成两阶段分野的俯冲板片破裂拆沉的发生时间(约 190Ma)与太平洋板块开始形成的时间相近, 是巧合还是两者有某种成因联系? 该模式主要考虑的是华南, 那么与华北克拉通破坏是什么关系?

晚白垩纪末或古近纪初在东亚陆缘发生了强烈的构造变革, 从主动陆缘变为被动陆缘, 大规模的张裂活动开始, 东海、南海直至泰国湾有一系列大型沉积盆地奠基(Ru et al, 1986; Zhou et al, 1995; 龚再升等, 1997; 侯方辉等, 2015)。导致这次变革的原因被认为是太平洋俯冲带的后撤(Zhou et al, 1995), 但实际上这一后撤只是根据火山弧和张裂盆地的发育特征推断的, 并没有被地球物理观测资料所证实。后撤何时发生? 后撤到哪里? 后撤的动力来源和机制是什么? 这些问题也许可从对太平洋域的重要构造事件的研究中得到解答。从前述可见, 古太平洋向东冈瓦纳俯冲的终止被认为发生在约 100Ma, 同时太平洋漂移方向发生顺时针转变, 而沿伊豆—小笠原—马里亚纳海沟及汤加—克马德克海沟发生的太平洋板块向西俯冲发生在约 50Ma,

正是太平洋漂移方向逆时针转变之时。前者是否指示了东亚陆缘从主动变被动的变革时间, 后者是否指示了后撤俯冲带的新位置? 这两个事件都是全球性的重大事件, 其运动学和动力学都是重要的研究课题。

5 关于扩张脊俯冲

本文的“扩张脊俯冲”指正在发生洋底扩张的活动洋脊的俯冲, 而不指已停止扩张的死亡洋脊的俯冲。由于古太平洋的演化历史是众多大洋板块陆续诞生、扩张和向周边俯冲消亡的历史, 扩张脊俯冲在环太平洋带并不少见, 如在北美、智利、南极半岛、所罗门岛、阿留申群岛、西南日本等地(Thorkelson, 1996; Sisson et al, 2003; 马本俊等, 2015)。与正常大洋俯冲相比, 扩张脊俯冲有许多不同之处, 也会对上板块的构造、岩浆活动和成矿作用产生强烈的影响, 因而自板块理论提出以来一直是研究的焦点之一(McCrory et al, 2009)。了解扩张脊俯冲的特点、探讨东亚陆缘所经历的扩张脊俯冲及其效应也应是研究东亚陆缘的构造演化研究的重要内容。

5.1 扩张脊俯冲与板片窗

5.1.1 发生扩张脊俯冲的条件

由于扩张脊附近的洋壳是热而轻的年轻洋壳, 而年龄小于 10Ma 的洋壳相对于软流圈会具有正浮力, 因此年轻洋壳进入俯冲带时会导致俯冲角度的变小和速率的降低, 甚至在扩张脊进入俯冲带以前就导致俯冲停止, 使正浮力部分的洋壳分离成为新的板块(如加州和墨西哥海外)。只有当下述现象单一或组合发生时扩张脊俯冲才会发生: 1) 洋脊推力加俯冲板片拖曳力大于洋壳的正浮力; 2) 洋壳强度较大而不会断裂; 3) 板片进入俯冲带后发生角闪岩相和榴辉岩相变质而使年轻洋壳密度增大到具有负浮力(Cloos, 1993; Thorkelson, 1996)。

5.1.2 板片窗的特征和识别标志

由于扩张脊是离散型板块边界, 扩张脊的俯冲很容易导致进入俯冲的两个大洋板片间的分裂, 形成板片窗。在板片窗内, 下板片的软流圈上涌而与上板片直接接触, 改变了上板片的温度、压力、应力、化学条件和岩浆来源, 从而出现一系列不同于正常俯冲带的特征, 可作为识别标志(Thorkelson et al, 2005; McCrory et al, 2009):

1) 局部性异常岩浆活动: 由于不再有俯冲板片给上覆地幔楔提供水分, 正常火山弧岩浆活动中断, 出现一系列异常岩浆活动, 不仅出现在火山弧部位, 而且出现在海沟和弧前区。岩浆活动具有一

定的空间分布模式,在海沟附近由于地幔在狭窄的空间中上升减压熔融(吹管效应)产生似MORB玄武岩,在弧前区地壳熔融形成过铝质花岗岩,在弧后区地幔熔融比例降低而形成似洋岛型碱性岩,或因对流加热使古老岩石圈熔融而产生富集岩浆,在板片窗的两侧边缘,上升的软流圈的热侵蚀使俯冲的年轻板片边缘变成羽状,或发生深熔作用(anatexis),在角闪石带形成埃达克质和非埃达克(闪长-英安)质

岩浆,在石榴石稳定带形成高镁安山岩、钙质埃达克岩岩浆及残留岩(多为榴辉岩)(Sisson et al, 2003)(图11)。地球化学成分显示岩浆源区在脱水深度以上或在下板片的软流圈(McCrory et al, 2009)。与通常达不到部分熔融条件的一般俯冲板片不同,年轻的(<25Ma)、较热的MORB在75~85km深处可部分熔融形成埃达克岩,因此埃达克岩常出现于板片窗边缘,同时还会出现高镁安山岩和富铌玄武岩(Sun et al, 2010)。

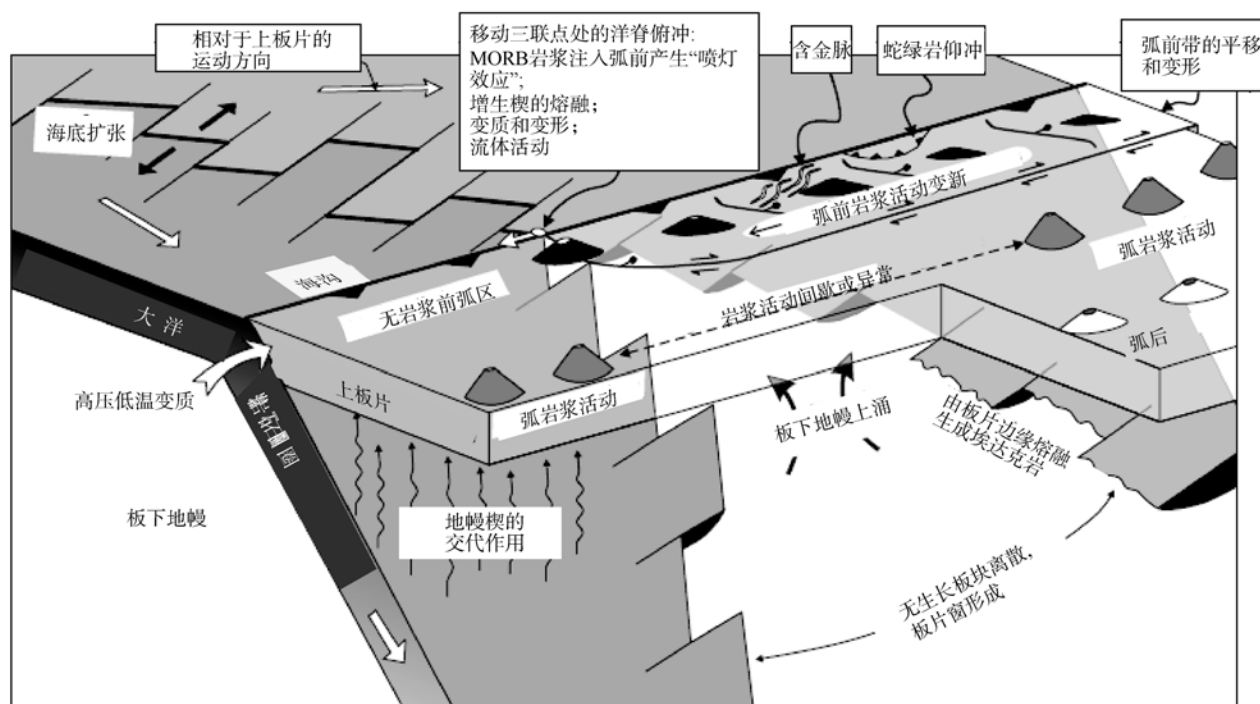


图 11 扩张脊俯冲相伴的地质过程示意图[据库拉—法拉隆扩张脊向北美科迪勒拉俯冲的实例绘制, 译自 Sisson 等 (2003)]

Fig. 11 Schematic block diagram illustrating various geological processes associated with the subduction of the Kula-Farallon Ridge towards the North American Cordillera. From Sisson et al (2003)

2) 异常的高地热流和高温低压变质作用, 甚至可见干热富 CO_2 的流体活动, 特别是在通常显示低热流的弧前区, 这是由下板块软流圈在板片窗中的隆升而引起。出于同样的原因, 缺乏俯冲带地震活动和在陆壳下出现低速异常也可作为现代活动板片窗的识别标志。

3) 局部性构造变动: 火山弧区与深部密度和温度变化有关的局部隆升、伸展、沉降、或与断裂、旋转和平错有关的弧前区分段等。

4) 地震层析成像也有可能提供辅助标志。

板片窗的几何形态受多种因素控制, 如俯冲前扩张脊和转换断层的配置、扩张脊与俯冲带的几何关系(交点位置、平面夹角)和相对运动、扩张脊两侧板片的俯冲角度和速度等。在扩张脊与俯冲带大角度相交且交点位置不变的端元条件下, 板片

窗会成为从交点出发的“V”字形向内陆深部延伸; 而在扩张脊大致平行于俯冲带的另一端元条件下, 俯冲点会平移, 板片窗会呈复杂的不对称锯齿状, 且俯冲系统可断为数段。在俯冲系统相对位置发生改变的情况下, 年轻的板片窗可叠置在较早的板片窗或(和)正常的火山弧之上, 使岩浆岩和构造的配置出现更为复杂的图景(Thorkelson, 1996; McCrory et al, 2009)。

5.1.3 扩张脊俯冲的效应

除了有可能形成板片窗和带来一系列相关的效应之外, 扩张脊俯冲还有可能带来其他效应, 如构造效应和成矿效应。

由于扩张脊附近的年轻洋壳热而轻, 扩张脊的俯冲也有可能导致俯冲的终止(Thorkelson, 1996)。由于软流圈在板片窗的被动上涌, 以及板片窗为

地幔侧向流动提供了空间,板片窗边缘的地幔流模式会显著不同于通常俯冲带下板块地幔的角流(corner-flow)模式。地幔流模式的改变会导致板片温度的升高以及深熔质流体和残留岩碎块的迁移,甚至板块运动的重组(Seton et al, 2015)。

斑岩铜矿占世界铜矿储量的60%以上,主要产于环太平洋带,尤其是智利和菲律宾。斑岩型铜矿和浅成热液金矿大多与埃达克岩伴生,空间上则与洋脊或岛弧的俯冲有关(Sajona et al, 1998; Oyarzun et al, 2001; Cooke et al, 2005)。Sun等(2010、2011)探讨了斑岩铜(金)矿床、埃达克岩及扩张脊俯冲之间的成因联系。他们认为Cu的初始丰度(而不是高的氧逸度)是成矿的主控因素,洋壳的Cu的丰度(74×10^{-6})高于原始地幔(30×10^{-6})和陆壳(27×10^{-6})的两倍以上,因而洋壳的部分熔融可提供较多的Cu。由于较热的年轻(<25Ma)洋壳在俯冲到75~85km深度时可发生部分熔融而形成富Cu的埃达克岩,所以斑岩铜矿与洋脊俯冲有关的埃达克岩密切伴生并有成因联系,反之,陆壳部分熔融成因和岩浆分异成因的埃达克岩中Cu的初始含量很低,因而不伴生斑岩铜矿。

5.2 关于东亚陆缘扩张脊俯冲的研究

根据目前的认识,中生代以来东亚陆缘先后经历了多个板块的俯冲,因此也应该经历过多次扩张脊的俯冲。但是,与美洲西部陆缘开展过大量详细的扩张脊俯冲研究相比,对东亚陆缘扩张脊俯冲的研究要薄弱得多,只限于在全球性或区域性的构造重建研究中附带的讨论,迄今还没有进行过专门的研究。以下仅简述文献中提出过的一些看法。

基于西南日本俯冲增生带研究和Engelbreton等(1985)的全球板块构造重建模型,Maruyama等(1997)编绘了日本列岛750Ma以来的古地理重建系列图。按他们的模式,东亚陆缘自三叠纪以来先后经历了法拉隆、依扎奈崎、太平洋和菲律宾海等板块的俯冲,其中法拉隆—依扎奈崎扩张脊(F-I扩张脊)的俯冲发生在晚三叠世到早侏罗世(220~180Ma),扩张脊与海沟呈左行大角度斜交,因而沟—脊—沟(TRT)三联点随俯冲的进程不断向北东位移。依扎奈崎—太平洋扩张脊(I-P扩张脊)的俯冲发生在晚白垩世至古新世(90~60Ma),扩张脊与海沟近垂直,TRT三联点还是不断向北东位移(图12a、12b,注意该图中I-P扩张脊自早白垩世以来一直与东亚陆缘以大角度相交)。这两次扩张脊俯冲的证据都是能指示板片窗形成的近海沟岩浆活动、弧前区的隆升剥蚀和

高P/T变质作用,如三郡(Sangun)带的高P/T片岩和同期的大堡—船津(Daebo—Funatsu)花岗岩带指示晚三叠世到早侏罗世法拉隆—依扎奈崎扩张脊的俯冲,而三波川(Sanbagawa)带的高P/T片岩的隆升剥蚀和花岗岩基—酸性火山活动高峰则作为晚白垩世至古新世依扎奈崎—太平洋扩张脊俯冲的证据。另外,热史研究揭示(Choi et al, 2011),朝鲜半岛东南部Jinan和Gyeongsang走滑拉分盆地、中国东北的延吉花岗岩、西南日本的领家(Ryoke)和三波川(Sanbagawa)带都在95~80Ma发生短期的快速隆升,也被认为是晚白垩世发生I-P扩张脊俯冲的证据。

关于I-P扩张脊的俯冲,另一种观点认为发生在古新世60~50Ma或始新世55~43Ma(Whittaker et al, 2007; Seton et al, 2012),依据主要是在西南日本和朝鲜半岛安第斯型花岗岩基活动发生间歇、四万十(Shimanto)带出现高地热异常以及地震层析成像发现俯冲板片于60~50Ma期间在中地幔发生拆离(Seton et al, 2015)。Seton等(2012)根据新的板块运动重建模型,认为I-P扩张脊在俯冲时与海沟近平行而不是以高角度相交(图12c),并认为I-P扩张脊的俯冲引起了太平洋板块拖曳力减小至消失以及中地幔流模式的显著改变,是晚始新世太平洋区域板块—地幔系统的大规模重组事件的触发因素(Seton et al, 2015)。

第三种观点认为I-P洋脊在早白垩世(140~125Ma)向下扬子区俯冲并形成板片窗(图12d)(Ling et al, 2009; Zhao et al, 2015),主要依据是下扬子区中部出现起源于地幔上涌的A型花岗岩,而两侧出现起源于洋壳熔融及与岩石圈地幔混合的富Mg埃达克岩,以及起源于交代岩石圈地幔的熔融的富铌玄武岩。Sun等(2007、2011)认为该时期下扬子区的斑岩铜—金矿床与洋脊俯冲形成埃达克岩密切相关。Jiang等(2015)认为新的地震层析成像结果揭示了下扬子区存在年龄为150~135Ma的板片窗。

由上述可见,目前对I-P扩张脊向东亚陆缘俯冲的研究程度还较低,已提出的几种模式间差异较大,证据都不是很充分。东亚陆缘绵延数千公里,南西段发生I-P扩张脊俯冲有可能比北东段更早,特征也有可能发生变化。如果扩张脊与海沟近似平行,则不同配置的扩张脊与转换断层系统在俯冲时有可能造成非常复杂的图景。加强扩张脊俯冲方面的研究,有可能为认识华东、华南和南海大陆架的岩浆活动、构造变动、新生代盆地发育、成矿作用等提供新的启示。

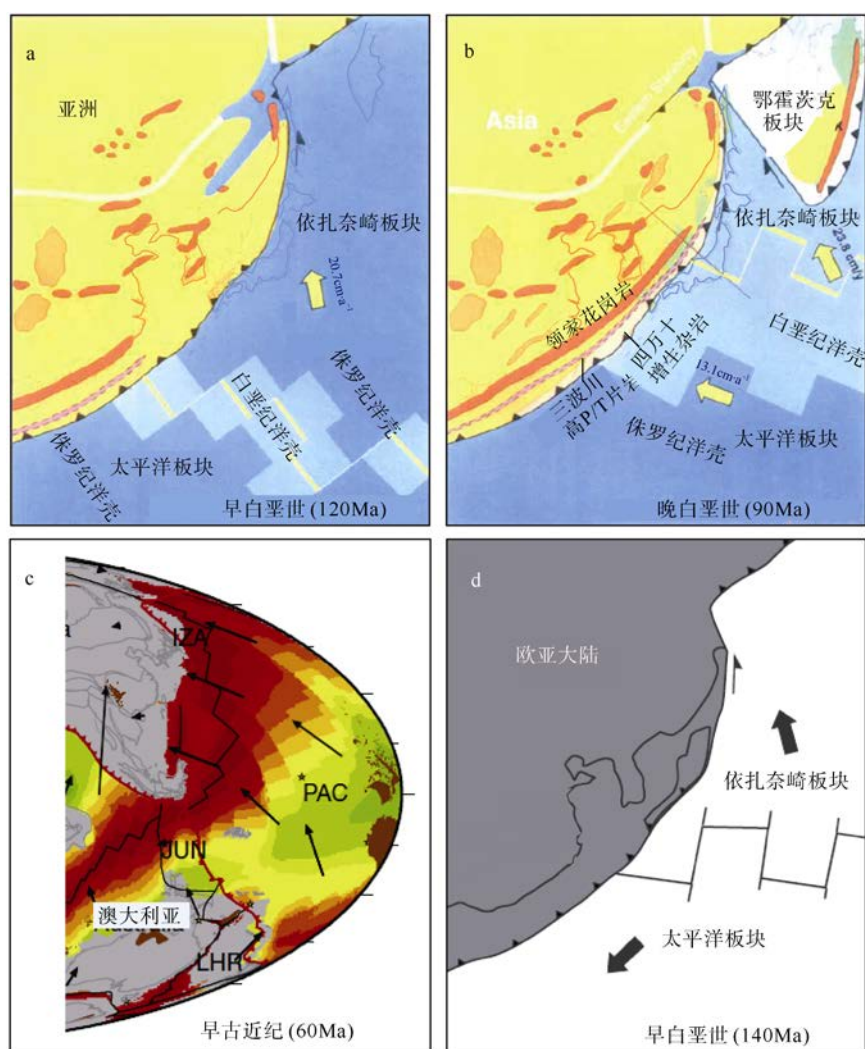


图 12 依扎奈崎—太平洋扩张脊俯冲模式图

a 和 b: 白垩纪近垂直俯冲模式。白垩纪时扩张脊与海沟近垂直地俯冲, 且三联点向北东位移(Maruyama et al, 1997)。黄色箭头及其标示: 板块运动方向及其速率。c: 早古近纪近平行俯冲模式。早古近纪时扩张脊与海沟近平行地俯冲(Seton et al, 2012); IZA: 依扎奈崎板块; PAC: 太平洋板块; JUN: 江可申板块; LHR: 豪勋爵隆起板块; 黑色箭头表示板块运动方向。d: 早白垩世斜交俯冲模式。早白垩世时扩张脊向下扬子地块俯冲, 与海沟大角度相交(Ling et al, 2009); 黑色箭头表示板块运动方向

Fig. 12 Models for the subduction of the Izanagi-Pacific Ridge

6 结束语

“人类观察世界, 关键在于视野和视角”, “回顾人类认识世界的过程, 也就是一部不断扩展视野的历史”(汪品先, 2009)。认识东亚陆缘中生代构造演化, 也需要将视野从东亚陆缘扩大到全球, 将视角从陆地扩大到海洋。(古—今)太平洋是地球上发育历史最悠久的大洋, 是最靠近东亚陆缘、向东亚陆缘俯冲了至少两亿年的大洋, 因此必然会强烈影响邻近的东亚陆缘的中生代构造演化。本文从太平洋域与特提斯域地质过程对比、古太平洋演化的重要事件及扩张脊俯冲3个方面简要介绍太平洋域构造演化的研究成果, 特别是最新成果, 探讨晚中生

代以来太平洋域构造演化对东亚陆缘的可能影响, 以期引起学界对有关研究的重视, 并提供一份快速参考资料。

本文指出, 太平洋域有别于特提斯域的主要特征是: 在至少两亿年的长期发育历史中一直保持为缺乏陆块介入的“干净”大洋; 这可作为辨识太平洋构造域在东亚陆缘影响的基础。

本文简要介绍了晚中生代以来太平洋域所经历的重大构造事件, 包括约 190Ma 时太平洋板块诞生的事件, 以及侏罗/白垩纪之交、早白垩世阿普特期(约 125Ma)、白垩世中期(约 100Ma)、早始新世(约 50Ma)几次板块重组或/和大火山岩省侵位事件, 以及之后的 3 次板块漂移方向变化事件。介绍了迄今

在这些事件对东亚陆缘的影响方面的若干研究。

环太平洋带的一个重要和特殊的地质过程是扩张脊俯冲。本文介绍了扩张脊俯冲及板片窗的识别特征,以及对东亚陆缘所经历的依扎奈崎—太平洋扩张脊俯冲的已有研究和存在问题。

虽然本文只涉及太平洋域板块过程的很少几个方面,就已可说明认识太平洋域板块过程对研究东亚陆缘构造演化的重要性,也可看出目前有关研究还相当薄弱,存在问题很多。开展太平洋域构造演化对东亚陆缘的可能影响方面的研究,一方面需要在陆缘和大陆架的研究中注意观察大洋

俯冲、扩张脊俯冲、大洋构造事件等在沉积、构造、岩浆、成矿等方面的表现和效应;另方面需要在上述研究及全球海陆板块运动重建的背景下进行对西太平洋—东亚陆缘的区域性海陆板块运动重建和构造演化回溯,以弥补迄今全球重建模型在这一地带的不足。由于现今东亚陆缘与太平洋并非直接接触,而是以菲律宾海和一系列边缘海相隔,菲律宾海和其他边缘海的形成演化历史都对太平洋与东亚的相互作用有至关重要的影响,都是西太平洋陆缘的板块运动的回溯中的难点;这些尚需另文进行专门的讨论。

参考文献 References

- 陈智梁, 1994. 特提斯地质一百年[J]. 特提斯地质, (18): 1–22.
CHEN ZHILIANG, 1994. Tethyan geology for 100 years[J]. Tethyan Geology, (18): 1–22 (in Chinese).
- 龚再升, 李思田, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社: 510. GONG ZAISHENG, LI SITIAN, 1997. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern south China Sea[M]. Beijing: Science Press: 510 (in Chinese).
- 侯方辉, 张训华, 李刚, 等, 2015. 从被动陆缘到主动陆缘——东海陆架盆地中生代构造体制转换的盆地记录[J]. 石油地球物理勘探, 50(5): 980–990. HOU FANGHUI, ZHANG XUNHUA, LI GANG, et al, 2015. From passive continental margin to active continental margin: basin recordings of Mesozoic tectonic regime transition of the East China Sea Shelf Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 50(5): 980–990 (in Chinese).
- 马本俊, 吴时国, 范建柯, 2015. 板片窗构造研究综述[J]. 海洋地质前沿, 31(12): 1–10. MA BENJUN, WU SHIGUO, FAN JIANKE, 2015. An overview of slab window[J]. Marine Geology Frontiers, 31(12): 1–10 (in Chinese).
- 潘桂棠, 1994. 全球洋—陆转换中的特提斯演化[J]. 特提斯地质, (18): 23–40. Pan Guitang, 1994. An Evolution of tethys in global ocean—continent transformation[J]. Tethyan Geology, (18): 23–40 (in Chinese).
- 万天丰, 2007. 中国大地构造学纲要[M]. 北京: 地质出版社: 387.
- 汪品先, 2009. 海底之争和科技界的历史责任[J]. 科技导报, 27(19): 3. WANG PINXIAN, 2009. Scramble for the seabed and historical duty of scientists[J]. Science & Technology Review, 27(19): 3 (in Chinese).
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145–1174. WU FUYUAN, XU YIGANG, GAO SHAN, et al, 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1145–1174 (in Chinese).
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 24(1): 1–12.
- YIN HONGFU, WU SHUNBAO, DU YUANSHEG, et al, 1999. South China defined as part of tethyan archipelagic ocean system[J]. Earth Science – Journal of China University of Geosciences, 24(1): 1–12 (in Chinese).
- 翟明国, 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1037–1046. ZHAI MINGGUO, 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: a summary and review[J]. Science China Earth Sciences, 54(8): 1110–1120 (in Chinese).
- 周蒂, 陈汉宗, 孙珍, 等, 2005. 南海中生代三期海盆及其与特提斯和古太平洋的关系[J]. 热带海洋学报, 24(2): 16–25. ZHOU DI, CHEN HANZONG, SUN ZHEN, et al, 2005. Three Mesozoic sea basins in eastern and southern South China Sea and their relation to Tethys and Paleo-Pacific domains[J]. Journal of Tropical Oceanography, 24(2): 16–25. (in Chinese).
- 周新华, 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题[J]. 地学前缘, 13(2): 50–64. ZHOU XINHUA, 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic–Mesozoic: review and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 13(2): 50–64 (in Chinese).
- 朱光, 王薇, 顾承串, 等, 2016. 郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示[J]. 岩石学报, 32(4): 935–949. ZHU GUANG, WANG WEI, GU CHENGCHUAN, et al, 2016. Late Mesozoic evolution history of the Tan–Lu Fault Zone and its indication to destruction processes of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(4): 935–949 (in Chinese).
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583–592. ZHU RIXIANG, CHEN LING, WU FUYUAN, et al, 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 54(6): 789–797 (in Chinese).
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等, 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135–1159. ZHU RIXIANG, XU YIGANG, ZHU GUANG, et al. 2012. Destruction of the north

- China craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565–1587 (in Chinese).
- ANDERSON D L, NATLAND J H, 2014. Mantle updrafts and mechanisms of oceanic volcanism[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(41): E4298–E4304.
- BARBER A J, 2000. The origin of the Woyla Terranes in Sumatra and the Late Mesozoic evolution of the Sundaland margin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 713–738.
- BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P, 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6299–6328.
- CHANDLER M T, WESSEL P, TAYLOR B, et al, 2012. Reconstructing Ontong Java Nui: implications for Pacific absolute plate motion, hotspot drift and true polar wander[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 331/332: 140–151.
- CHOI T, LEE Y I, 2011. Thermal histories of Cretaceous basins in Korea: implications for response of the East Asian continental margin to subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Island Arc*, 20(3): 371–385.
- CLOOS M, 1993. Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 105(6): 715–737.
- COFFIN M F, PRINGLE M S, DUNCAN R A, et al, 2002. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma[J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 1121–1137.
- COOKE D R, HOLLINGS P, WALSH J L, 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 100(5): 801–818.
- DING HUIXIA, ZHANG ZEMING, DONG XIN, et al, 2016. Early Eocene (c. 50 Ma) collision of the Indian and Asian continents: constraints from the North Himalayan metamorphic rocks, southeastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 435: 64–73.
- ENGEBRETSON D C, COX A, GORDON R G, 1984. Relative motions between oceanic plates of the Pacific Basin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 89(B12): 10291–10310.
- ENGEBRETSON D C, COX A, GORDON R G, 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 206: 1–60.
- FLOWER M, TAMAKI K, HOANG N, 1998. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East Asia and the Western Pacific[M]// FLOWER M F J, CHUNG S-L, LO C-H, et al. *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. Washington D C: AGU: 67–88.
- FOULGER G R, 2007. The “plate” model for the genesis of melting anomalies[M]// FOLGER G R, JURDY D M. *Plates, plumes, and planetary processes*. Boulder: Geological Society of America: 1–28.
- HEYDOLPH K, MURPHY D T, GELDMACHER J, et al, 2014. Plume versus plate origin for the Shatsky Rise oceanic plateau (NW Pacific): insights from Nd, Pb and Hf isotopes[J]. *Lithos*, 200/201: 49–63.
- HILDE T W C, UYEDA S, KROENKE L, 1977. Evolution of the western Pacific and its margin[J]. *Tectonophysics*, 38(1/2): 145–152, 155–165.
- HUTCHISON C S, 2005. *Geology of north-west borneo: sarawak, brunei and sabah*[M]. Amsterdam: Elsevier: 444.
- ISOZAKI Y, 1996. Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: a new view of geotectonic subdivision and evolution of the Japanese Islands[J]. *Island Arc*, 5(3): 289–320.
- ISOZAKI Y, AMISCARAY E A, RILLON A, 1988. Permian, Triassic and Jurassic bedded radiolarian cherts in North Palawan Block, Philippines: evidence of Late Mesozoic subduction–accretion[M]// ICHIKAWA K. Report No. 3 of the IGCP Project 224: Pre-Jurassic evolution of Eastern Asia. Osaka: IGCP: 99–115.
- JIANG GUOMING, ZHANG GUIBIN, ZHAO DEPING, et al, 2015. Mantle dynamics and Cretaceous magmatism in east-central China: insight from teleseismic tomograms[J]. *Tectonophysics*, 664: 256–268.
- KOPPERS A A P, MORGAN J P, MORGAN J W, et al, 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(3/4): 237–252.
- KOPPERS A A P, STAUDIGEL H, DUNCAN R A, 2003. High-resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the oldest oceanic basement basalts in the western Pacific basin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(11): 8914.
- KORENAGA J, SAGER W W, 2012. Seismic tomography of Shatsky Rise by adaptive importance sampling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(B8): B08102.
- LI SANZHONG, ZHAO GUOCHUN, SUN MIN, et al, 2004. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji Granites, eastern block, North China craton[J]. *International Geology Review*, 46(2): 162–176.
- LI SANZHONG, ZHAO GUOCHUN, DAI LIMING, et al, 2012. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 64–79.
- LI ZHEN, QIU JIANSHENG, YANG XUEMEI, 2014. A review of the geochronology and geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) plutons along the Fujian coastal area of southeastern China: implications for magma evolution related to slab break-off and rollback in the Cretaceous[J]. *Earth-Science Reviews*, 128: 232–248.
- LI ZHENGXIANG, LI XIANHUA, 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179–182.
- LI ZHENGXIANG, LI XIANHUA, CHUNG S-L, et al, 2012. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: transition from an

- Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary[J]. *Tectonophysics*, 532/535: 271–290.
- LING MINGXING, WANG FANGYUE, DING XING, et al, 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, Eastern China[J]. *Economic Geology*, 104(2): 303–321.
- LIU LEI, XU XISHENG, XIA YAN, 2014. Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: evidence from episodic volcanism and related intrusions[J]. *Tectonophysics*, 614: 170–184.
- MARUYAMA S, ISOZAKI Y, KIMURA G, et al, 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. *Island Arc*, 6(1): 121–142.
- MATTHEWS K J, SETON M, MÜLLER R D, 2012. A global-scale plate reorganization event at 105–100 Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 355/356: 283–298.
- MCCRORY P A, WILSON D S, 2009. Introduction to special issue on: interpreting the tectonic evolution of Pacific rim margins using plate kinematics and slab-window volcanism[J]. *Tectonophysics*, 464(1/2/3/4): 3–9.
- METCALFE I, 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 605–623.
- METCALFE I, 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33.
- MIZUTANI S, YAO A, 1991. Radiolarians and terranes: mesozoic geology of Japan[J]. *Episodes*, 14(3): 213–216.
- MÜLLER R D, SDROLIAS M, GAINA C, et al, 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): Q04006.
- NAKANISHI M, SAGER W W, KLAUS A, 1999. Magnetic lineations within Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean: implications for hot spot-triple junction interaction and oceanic plateau formation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 104(B4): 7539–7556.
- NAKANISHI M, TAMAKI K, KOBAYASHI K, 1989. Mesozoic magnetic anomaly lineations and seafloor spreading history of the northwestern Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 94(B11): 15437–15462.
- NORTHRUP C J, ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. *Geology*, 23(8): 719–722.
- O'CONNOR J M, STEINBERGER B, REGELOUS M, et al, 2013. Constraints on past plate and mantle motion from new ages for the Hawaiian–Emperor Seamount Chain[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10): 4564–4584.
- OYARZUN R, MÁRQUEZ A, LILLO J, et al, 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism[J]. *Mineralium Deposita*, 36(8): 794–798.
- RICHARDSON W P, OKAL E A, VAN DER LEE S, 2000. Rayleigh-wave tomography of the Ontong-Java Plateau[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 118(1/2): 29–51.
- RU KE, PIGOTT J D, 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 70(9): 1136–1155.
- SAGER W W, HANDSCHUMACHER D W, HILDE T W C, et al, 1988. Tectonic evolution of the northern Pacific plate and Pacific–Farallon Izanagi triple junction in the Late Jurassic and Early Cretaceous (M21–M10)[J]. *Tectonophysics*, 155(1/2/3/4): 345–364.
- SAGER W W, PUERINGER M, CARVALLO C, et al, 2015. Paleomagnetism of igneous rocks from the Shatsky Rise: implications for paleolatitude and oceanic plateau volcanism[M]// NEAL C, SAGER W W, SANO T, et al. *The Origin, evolution, and environmental impact of oceanic large igneous provinces*. Washington D C: Geological Society of America: 511.
- SAGER W W, SANO T, GELDMACHER J, 2011. How do oceanic plateaus form? Clues from drilling at Shatsky Rise[J]. *EOS*, 92(5): 37–38.
- SAGER W W, SANO T, GELDMACHER J, 2016. Formation and evolution of Shatsky Rise oceanic plateau: insights from IODP expedition 324 and recent geophysical cruises[J]. *Earth–Science Reviews*, 159: 306–336.
- SAJONA F G, MAURY R C, 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences–Series A–Earth and Planetary Science*, 326(1): 27–34.
- ŞENGÖR A M C, 1989. The Tethyside orogenic system: an introduction[M]//ŞENGÖR A M C. *Tectonic evolution of the Tethyan Region*. Netherlands: Springer: 1–22.
- SETON M, FLAMENT N, WHITTAKER J, et al, 2015. Ridge subduction sparked reorganization of the Pacific plate-mantle system 60–50 million years ago[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(6): 1732–1740.
- SETON M, MÜLLER R D, ZAHIROVIC S, et al, 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth–Science Reviews*, 113(3/4): 212–270.
- SHARP W D, CLAGUE D A, 2006. 50-Ma initiation of Hawaiian–Emperor bend records major change in Pacific plate motion[J]. *Science*, 313(5791): 128–1284.
- SISSON V B, PAVLIS T L, ROESKE S M, et al, 2003. Introduction: an overview of ridge-trench interactions in modern and ancient settings[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 371: 1–18.
- SUN WEIDONG, DING XING, HU YANHUA, et al, 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the West Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3/4): 533–542.
- SUN WEIDONG, LING MINGXING, YANG XIAOYONG, et al, 2010. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: an overview[J]. *Science China Earth Sciences*, 53(4): 475–484.
- SUN WEIDONG, ZHANG HONG, LING MINGXING, et al, 2011. The genetic association of adakites and Cu-Au ore deposits[J]. *International Geology Review*, 53(5/6): 691–703.
- TAIRA A, OGAWA Y, 1991. Cretaceous to Holocene forearc

- evolution in Japan and its implication to crustal dynamics[J]. *Episodes*, 14(3): 205–212.
- TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R, 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia[C]// COWARD M P, RIES A C. *Collision tectonics*. London: Geological Society, Special Publications: 19: 113–157.
- TAPPONNIER P, PELTZER G, DAIN A Y L, et al, 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611–616.
- TARDUNO J A, SLITER W V, KROENKE L, et al, 1991. Rapid formation of Ontong Java Plateau by Aptian mantle plume volcanism[J]. *Science*, 254(5030): 399–402.
- TAYLOR B, 2006. The single largest oceanic plateau: ontong Java-Manihiki-Hikurangi[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3–4): 372–380.
- TEJADA M L G, GELDMACHER J, HAUFF F, et al, 2016. Geochemistry and age of Shatsky, Hess, and Ojin Rise seamounts: implications for a connection between the Shatsky and Hess Rises[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 185: 302–327.
- THORKELSON D J, 1996. Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation[J]. *Tectonophysics*, 255(1/2): 47–63.
- THORKELSON D J, BREITSPRECHER K, 2005. Partial melting of slab window margins: genesis of adakite and non-adakitic magmas[J]. *Lithos*, 79(1/2): 25–41.
- TIMM C, HOERNLE K, WERNER R, et al, 2011. Age and geochemistry of the oceanic Manihiki Plateau, SW Pacific: new evidence for a plume origin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 304(1/2): 135–146.
- TOMINAGA M, SAGER W W, TIVEY M A, et al, 2008. Deep-tow magnetic anomaly study of the Pacific Jurassic Quiet Zone and implications for the geomagnetic polarity reversal timescale and geomagnetic field behavior[J]. *Journal of Geophysical Research*, 113(B7): B07110.
- WAKITA K, 2000. Cretaceous accretionary–collision complexes in central Indonesia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 739–749.
- WESSEL P, HARADA Y, KROENKE L W, 2006. Toward a self-consistent, high-resolution absolute plate motion model for the Pacific[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7: Q03L12.
- WESSEL P, KROENKE L W, 2008. Pacific absolute plate motion since 145 Ma: an assessment of the fixed hot spot hypothesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 113(B6): B06101.
- WHITTAKER J M, MÜLLER R D, LEITCHENKOV G, et al, 2007. Major Australian–Antarctic plate reorganization at Hawaiian–Emperor Bend time[J]. *Science*, 318(5847): 83–86.
- WHITTAKER J M, AFONSO J C, MASTERTON S, et al, 2015. Long-term interaction between mid-ocean ridges and mantle plumes[J]. *Nature Geoscience*, 8(6): 479–483.
- WOODE M T, DAVIES G F, 1982. Late Cretaceous genesis of the Kula plate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 58(2): 161–166.
- WRIGHT N M, SETON M, WILLIAMS S E, et al, 2016. The Late Cretaceous to recent tectonic history of the Pacific Ocean basin[J]. *Earth–Science Reviews*, 154: 138–173.
- WU FUYUAN, LIN JINGQIAN, WILDE S A, 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1/2): 103–119.
- XU YIGANG, ZHANG HUIHUANG, QIU HUANING, et al, 2012. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: derived from the mantle transition zone[J]. *Chemical Geology*, 328: 168–184.
- YIN AN, HARRISON T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280.
- YUMUL JR G P, DIMALANTA C B, MARQUEZ E J, et al 2009. Onland signatures of the Palawan microcontinental block and Philippine mobile belt collision and crustal growth process: a review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 610–623.
- ZHANG JINCHANG, SAGER W W, KORENAGA J, 2016. The seismic Moho structure of Shatsky Rise oceanic plateau, northwest Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 441: 143–154.
- ZHANG JUNJUN, ZHENG YONGFEI, ZHAO ZIFU, 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China[J]. *Lithos*, 110(1/2/3/4): 305–326.
- ZHAO LIANG, GUO FENG, FAN WEIMING, et al, 2015. Early Cretaceous potassic volcanic rocks in the Jiangnan Orogenic Belt, East China: crustal melting in response to subduction of the Pacific–Izanagi ridge[J]. *Chemical Geology*, 437: 30–43.
- ZHOU DI, RU KE, CHEN HANZONG, 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 251(1/2/3/4): 161–177.
- ZHOU DI, WANG WANYIN, WANG JIALIN, et al, 2006. Mesozoic subduction–accretion zone in northeastern South China Sea inferred from geophysical interpretations[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 49(5): 471–482.
- ZHOU DI, SUN ZHEN, CHEN HANZHONG, et al, 2008. Mesozoic paleogeography and tectonic evolution of South China Sea and adjacent areas in the context of Tethyan and Paleo-Pacific interconnections[J]. *Island Arc*, 17(2): 186–207.
- ZHOU X M, LI W X, 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269–287.
- ZHU GUANG, JIANG DAZHI, ZHANG BILONG, et al, 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: evidence from crustal deformation kinematics[J]. *Gondwana Research*, 22(1): 86–103.