

doi:10.3799/dqkx.2013.097

拆离断层与大洋核杂岩:一种新的海底扩张模式

余 星,初凤友,董彦辉,李小虎,唐立梅

国家海洋局第二海洋研究所国家海洋局海底科学重点实验室,浙江杭州 310012

摘要:近年来,一种新的海底扩张模式引起了广大科学家的重视。它与一般的岩浆型洋中脊扩张不同,属于一种非岩浆或贫岩浆的海底扩张方式,扩张作用主要通过拆离断层的滑移来实现。拆离断层使下盘的深部洋壳或上地幔岩石出露到海底,形成了大洋核杂岩,通常表面呈现龟背似的波瓦状穹隆,或称巨型窗棱构造。从拆离断层、大洋核杂岩等基本概念入手,综述这种新型海底扩张模式的特征,总结归纳大洋核杂岩的分布状况及识别手段,探讨其地质意义以及对海底热液活动、成矿的积极影响。

关键词:拆离断层;大洋核杂岩;巨型窗棱构造;海底扩张;构造;热液活动;岩石学。

中图分类号:P736.1

文章编号:1000-2383(2013)05-0995-10

收稿日期:2013-02-10

Detachment Fault and Oceanic Core Complex: A New Mode of Seafloor Spreading

YU Xing, CHU Feng-you, DONG Yan-hui, LI Xiao-hu, TANG Li-mei

Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

Abstract: A new type of seafloor spreading mode has recently been well acknowledged among earth science community. It is different from normal magmatic spreading ridge. It is usually found along the slow or ultraslow spreading ridge where the segment is amagmatic or depleted in magma. The plate separation is mostly accommodated by detachment fault slipping. The low-angle large-offset detachment fault will uplift the footwall and exhume lower crust and upper mantle rocks, which is called oceanic core complex. The oceanic core complex, also named as megamullion, is often marked by corrugations and striations parallel to the extension direction. This paper presents the characteristics of this new kind of spreading mode based on in-depth argument about terminology of detachment fault and oceanic core complex. A distribution map of the known oceanic core complex has been composed. The possible methods and techniques that can be used to recognize oceanic core complexes are also discussed in this study, and so does the significance of the new findings and its influence on seafloor hydrothermal activity and mineral deposit.

Key words: detachment fault; oceanic core complex; megamullion; seafloor spreading; tectonics; hydrothermal activity; petrology.

0 引言

传统的板块构造学理论认为海底扩张是通过洋中脊区玄武质洋壳的增生完成的,即玄武质岩浆在地幔对流作用下沿洋中脊喷出或侵入,在老洋壳的前缘生成新的洋壳,推动两侧板块相向移动,达到海底扩张的目的(Hess, 1962)。但2010年在塞浦路斯以“大洋岩石圈拆离作用”为主题的Chapman会议上,科学界提出了一种新的海底扩张模式,即以大洋

拆离断层滑移来弥补扩张伸展量。这种新的海底扩张模式的发现是过去30多年来板块构造学领域最主要的研究进展之一(Canales and Escartin, 2010)。

以拆离断层作用为主导的海底扩张模式具有显著特征:拆离断层发育过程中常伴随大洋核杂岩的形成,辉长岩和蛇纹石化地幔岩在海底大面积出露,洋壳结构不同于正常的Penrose洋壳模型,受构造变形影响岩石圈很不均一,此外还常发育一些大型的富H₂和CH₄的深海热液系统,形成相关的热液

基金项目:国家海洋局青年基金项目(No.2011304);国家重点基础研究发展计划(No.2013CB429705);浙江省青年基金项目(No.LQ12D02001);国家基本科研业务费专项(No.JT1001);海洋公益性行业科研专项(No.201005003);大洋“十二五”项目(No.DY125-12-R-04)。

作者简介:余星(1981—),男,副研究员,主要从事岩石地球化学与海底资源成矿研究。E-mail: zjuyuxing@gmail.com

矿床，并孕育多样化的深海和海底地下生物圈(Canales and Escartin, 2010).因此这种扩张模式对认识岩石圈深部结构、岩石圈构造变形和应变局部化、深海热液系统形成和热液生态系统演化具有重要的意义。

本文将从这种新型海底扩张模式的主体，即拆离断层和大洋核杂岩入手，明确各自的含义，讨论拆离断层和核杂岩在大洋和大陆区使用的异同，总结拆离断层和大洋核杂岩的分布及识别标志，提出新型海底扩张模式的研究前景及面临的新问题。

1 拆离断层

拆离断层的概念来源于陆地，原指叠瓦状逆冲断层的底板断层，即滑脱面，后来被定义为“变质核杂岩与上覆沉积盖层之间的大规模低角度正断层”(Davis, 1988).在陆地上拆离断层分布较广，典型的有北美西部盆岭省的 Snake Range 拆离断层系(Miller and Gans, 1983; Gebelin et al., 2011)、挪威西部的 Nordfjord-Sogn 拆离断层系(Fossen, 1992)和美国加州东南部的 Whipple 拆离断层系(Davis, 1988)、喜玛拉雅的藏南拆离系(刘德民和李德威, 2003)、辽东半岛大营子拆离断层系(申亮等, 2011)及北京房山拆离断层系(姚丽景等, 2007)和内蒙古亚干拆离断层系(郑亚东和张青, 1993)等。拆离断层是一种低角度张性断层，倾角一般小于 30°(李武显和谢国刚, 1996)，它可能是继承了初始的低角度断层，也可能是初始高角度正断层经构造剥蚀的均衡效应引起断层向平缓方向旋转(Davis, 1996)。

大洋拆离断层是指形成于洋中脊或洋中脊附近的具有大断距的正断层，有相当一部分的板块分离位移量由拆离断层来充当。拆离断层的活动，往往伴随着大洋核杂岩的形成(Canales and Escartin, 2010).1981 年 Dick 等首次在大西洋中脊 Kane 转换断层附近发现了大型拆离断层，该拆离断层作用形成了穹隆状的 Atlantis Massif 大洋核杂岩(Dick et al., 1981; Karson and Dick, 1983)。

拆离断层的形成条件包含温度、岩浆供给量、水化、蚀变和变质作用、扩张速率和变形速率以及沿断层和下盘内部高效的可持续应变减弱机制。按温度条件的差异可以将拆离断层作用分为两种端元类型：(1) 高温型，具有广泛的糜棱岩化(800~950 °C)，如西南印度洋 Atlantis Bank；(2) 低温型，以滑石—透闪石—绿泥石—蛇纹石片岩为特征，下

盘中无糜棱岩化作用，如大西洋 30°N 和 15°45' N (McCaig et al., 2010).

拆离断层一般分布于慢速和超慢速扩张洋脊的贫岩浆段，但其发育并非与岩浆毫无关系。长期持续的拆离断层作用需要岩浆供应量的配合，过多或过少的岩浆供给都对其不利(Tucholke et al., 2008)。在岩浆供给较少的洋脊段，形成较小的拆离断层，如大西洋北部的 Gakkel 洋脊段、西南印度洋脊的最东段。相反，大型的拆离断层往往需要中等程度的岩浆供应量，如大西洋中脊。

在拆离断层发育过程中，水化、蚀变或变质作用起了关键的催化作用。按传统的岩石力学机制，在脆性地壳中一般只发育高角度断层、低角度拆离断层的形成表明脆性地壳中存在薄弱带，这些薄弱带可能是由于断层作用时海水进入，引起岩石的蚀变或变质而形成的，如橄榄岩蛇纹石化等。蚀变岩石强度较小，具有塑性特征，有利于断层沿薄弱带滑移，并使断层面逐渐平缓，更有效地满足洋脊扩张的需要(Canales and Escartin, 2010)。

在拆离断层活动的洋脊段，拆离断层引起的扩张是板块扩张的主体。最初认为拆离断层作用贡献的扩张量只占板块扩张的 10%~15%，其他均依靠岩浆注入来实现(Escartin et al., 1999)。但目前看来，拆离断层对这些洋脊段的板块扩张贡献远大于这个比例，达 70%~80%，甚至可达 100%(Canales and Escartin, 2010)。拆离断层活动一般可以持续 1~2 Ma，有的可以持续滑移 4 Ma。断层位移一般为 30~40 km，有的甚至可达 125 km，因而其可以有效地承担起贫岩浆洋脊段的板块扩张任务(Ohara et al., 2001)。

2 大洋核杂岩

大洋核杂岩的概念来源于陆地的变质核杂岩。由于岩石圈的伸展，构造上被低角度正断层拆离，发生基底隆升和地表剥蚀作用，引起地壳深部的变质岩和深成岩逐渐上升而出露地表，呈孤立的平缓穹隆状，这套深部岩石被称为变质核杂岩，因常出现在造山带的核部而得名(Davis and Coney, 1979)。

大洋核杂岩，有时也称海洋核杂岩(李三忠等, 2006)或洋底核杂岩，主要是指下地壳和上地幔岩石在沿扩张中心极强的构造拉张应力作用下发生去顶、抬升而形成的穹隆状构造岩石组合(Cann et al., 1997; Tucholke et al., 1998; Blackman

et al., 2002).大洋核杂岩的形成与拆离断层作用密不可分,穹隆状构造表面即为拆离断层的滑移面,常呈现波瓦状构造(corrugation)和平行扩张方向的条纹(striation),又称为巨型窗棱构造(megamullion)。不过,在拆离断层活动早期或滑移距离有限时,下地壳和上地幔岩石可能尚未揭露,大洋核杂岩未出现或尚未成型。

出露的大洋核杂岩主要岩石类型有蛇纹石化橄榄岩、橄长岩、辉长岩、辉长苏长岩、辉绿岩、蛇纹岩等。拆离面一般厚约 1 m,发育相关的构造岩系,主要为糜棱岩、绿泥石化角砾岩、微角砾岩、断层角砾和断层泥(楼法生等,2005)。与大陆变质核杂岩相比,大洋核杂岩形成于较薄的岩石圈,具有较高的地温梯度,主要以橄榄石和斜长石的流变为主,糜棱岩化作用较少,即变质程度一般较大陆低。拆离面上部有时可被玄武岩、碎屑沉积岩或远洋沉积物覆盖。

大洋核杂岩出露的地方常常伴有较大规模的热液活动,如 TAG 热液区(Escartin *et al.*, 2008)。拆离断层的发育使流体沿断层通道循环,引起围岩中金属元素(如铜、铅、锌等)活化和被抽提,最终在海底聚集成矿。另一方面,以地幔岩为主要成分的核杂岩在流体作用下极易发生蛇纹石化,岩石中丰富的金属元素为热液成矿提供了物质基础,同时创造的还原性热液环境方便金属元素以硫化物的形式沉淀。大洋核杂岩蛇纹石化作用使热液系统极其富集氢和甲烷,可以为深海独特的生态系统和生物多样

性提供支持。按热液系统发育的构造位置和热液温度,可以将与大洋核杂岩相关的热液系统分为 3 类:位于拆离断层上盘的黑烟囱系统(如 TAG)、位于断层面上的黑烟囱系统(如 Logatchev、Ashadze、Rainbow)和位于断层面上的低温热液系统(如 Lost City)(McCaig *et al.*, 2010)。

3 大洋核杂岩的分布

近年来,随着学界对大洋核杂岩研究热情的不断上涨,调查规模不断扩大,调查手段不断改进,深海大洋中越来越多的大洋核杂岩被大家所认识(图 1,表 1)。目前全球约有 50 处分布大洋核杂岩,主要分布区域为大西洋中脊、西南印度洋脊、中印度洋脊、东南印度洋脊的澳洲—南极不整合段(AAD)、菲律宾海的帕里西维拉海脊等(Cann *et al.*, 1997; Ohara *et al.*, 2001; Searle *et al.*, 2003; Okino *et al.*, 2004; Canales *et al.*, 2007; Tucholke *et al.*, 2008; Blackman *et al.*, 2009; Morishita *et al.*, 2009; Ray *et al.*, 2011)。此外,还有少量分布于智利海隆(Martinez *et al.*, 1998)和卡尔斯伯格海岭(韩喜球等,2012,个人通信)。从大洋核杂岩分布图上可以清晰地看出,在慢速扩张洋脊,大洋核杂岩分布较多,如大西洋中脊和西南印度洋脊,而在快速扩张的东太平洋海隆,目前还没有大洋核杂岩方面的报道。

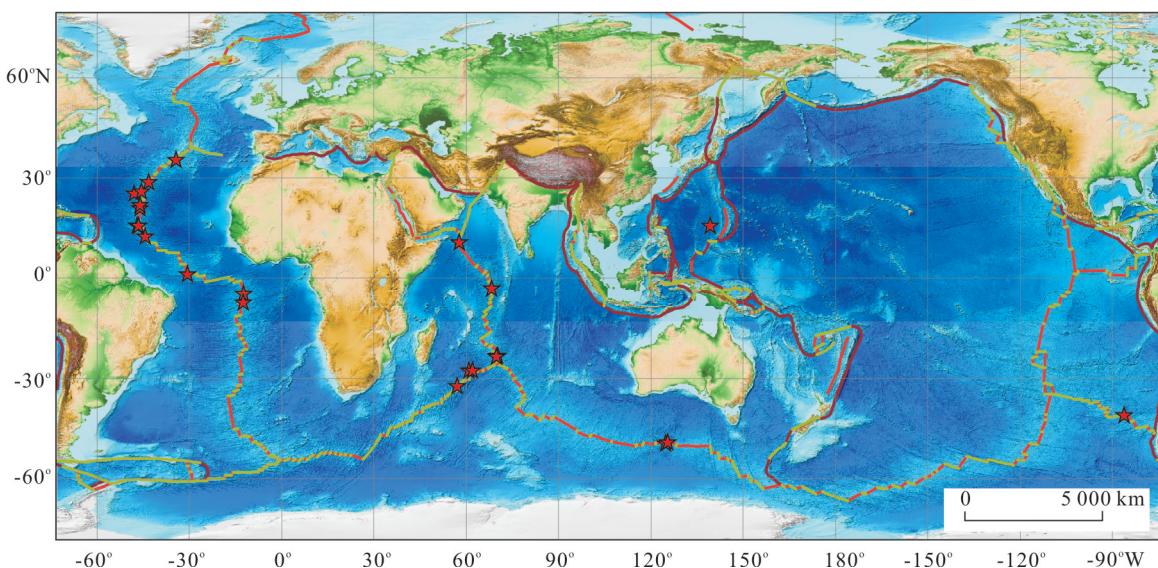


图 1 全球已发现的大洋核杂岩分布图(数据说明见表 1)

Fig.1 Location of known oceanic core complexes around the world

星号代表大洋核杂岩分布地点

表1 全球已发现的大洋核杂岩分布信息

Table 1 Distribution information of known oceanic core complexes around the world

地域	出露位置	经度	纬度	构造特征	岩石类型	相关热液区	参考文献
	Saldanha Massif	33°26'W	36°40'N	具有穹隆状构造,但窗棱构造不明显	地幔岩、蛇纹岩、玄武岩、碎石	Saldanha	Miranda <i>et al.</i> , 2002
	Atlantis Massif	42°10'W	30°08'N	Atlantis转换断层以北,波瓦状穹隆构造	致密绿色橄榄岩,玄武岩、辉长岩、蛇纹岩、岩屑	Lost City	Cann <i>et al.</i> , 1997; Rano and Reston, 1999; Blackman <i>et al.</i> , 2002; Nooner <i>et al.</i> , 2003; Canales <i>et al.</i> , 2004; Ildefonse <i>et al.</i> , 2007
	27°N	47°00'W	26°45'N	Atlantis 和 Kane 转换断层之间,波瓦状构造	蛇纹石化橄榄岩(重力推断)		McKnight, 2001
	TAG	44°46'W	26°10'N	拆离断层,穹隆构造	辉长岩、辉绿岩,蛇纹石化橄榄岩(地震波速推断)	TAG	Canales <i>et al.</i> , 2007; deMartin <i>et al.</i> , 2007; Escartin <i>et al.</i> , 2008
大西洋中脊	Kane	45°03'W	23°32'N	Kane转换断层以南,显著的波瓦状构造(Kane巨型窗棱构造)	蛇纹石橄榄岩、糜棱化和角闪石化的辉长岩、蛇纹岩	Snake Pit	Karson and Dick, 1983; Tucholke <i>et al.</i> , 2008; Dannowski <i>et al.</i> , 2010; Cheadle and Grimes, 2010
	15°45'N	46°54'W	15°45'N	15°20'N转换断层以北,波瓦状构造	辉长岩、蛇纹石化橄榄岩、辉绿岩	Logatchev	MacLeod <i>et al.</i> , 2002; Fujiwara <i>et al.</i> , 2003; McCaig <i>et al.</i> , 2007; Smith <i>et al.</i> , 2003; Bach <i>et al.</i> , 2011
	St Peter Saint Paul	29°18'W	0°48'N	St Paul转换断层, Brachiosaurus巨型窗棱构造	深海橄榄岩		Sichel <i>et al.</i> , 2008
	5°S	11°42'W	5°10'S	5°S转换断层	蛇纹岩、辉长岩、玄武岩		Reston <i>et al.</i> , 2002
	Ascension	12°30'W	7°12'S	Ascension转换断层	辉长岩、橄榄岩、蛇纹岩		Steinfeld <i>et al.</i> , 2009
卡尔斯伯格海岭	Carlsberg Ridge	58°~62°E	9°~5°N				韩喜球等, 2012, 个人通讯
中印度洋脊	Vityaz	68°30'E	5°30'S	Vityaz转换断层,Vityaz巨型窗棱构造	辉长岩		Ray <i>et al.</i> , 2011
	25°S	69°50'E	25°18'S	靠近 Rodriguez 三联点,显著的窗棱构造	地幔橄榄岩、辉长岩等,橄榄岩	Kairei	Mitchell <i>et al.</i> , 1998; Morishita, 2009; Nakamura <i>et al.</i> , 2009
西南印度洋脊	FUJI Dome	63°45'E	28°03'S	呈现波瓦状构造	玄武岩、辉长岩、蛇纹石化方辉橄榄岩	Mont Jourdanne	Searle <i>et al.</i> , 2003; Sauter <i>et al.</i> , 2008
	Atlantis Bank	57°16'E	32°43'S	Atlantis II转换断层	橄榄辉长岩、辉长岩、氧化辉长岩		Dick <i>et al.</i> , 2000; Baines <i>et al.</i> , 2003
东南印度洋脊	AAD Segment B3, Segment B4	125°40'E	49°35'S	Warringa转换断层	地幔橄榄岩、辉长岩、绿片岩等		Christie <i>et al.</i> , 1998; Okino <i>et al.</i> , 2004
菲律宾海帕里西维拉海脊	Segment S1	139°E	16°N	Godzilla巨型窗棱构造	地幔橄榄岩	Paree Vela Ridge	Ohara <i>et al.</i> , 2001, 2011
智利海隆	Chile Rise	84°50'W	41°31'S				Martinez <i>et al.</i> , 1998

4 大洋核杂岩的识别标志

大洋核杂岩以其特有的形态和结构区别于正常的洋中脊和洋壳,可以采用多种探测手段和方法识别大洋核杂岩的踪迹,主要包括地形地貌识别、重力、磁力、地震异常推断和岩性识别等。

4.1 地形地貌

大洋核杂岩最显著的地貌特征是拆离表面呈现巨型窗棱构造,即具有穹窿状的突起和平行于滑移方向的波瓦状条纹(Tucholke *et al.*, 1998)(图 2)。穹隆状的巨型窗棱构造沿滑移方向出露长达 16~35 km,出露面积 140~800 km²,一般高出周围洋壳 1.2~2.0 km。波瓦状条纹垂直于洋脊中轴,其振幅(起伏高差)在数十米到上百米,有的甚至达 600~700 m,波长(条纹间隔)最小达数百米,最长达 6~8 km(Tucholke *et al.*, 1998)。这些大尺度的地形特征很容易在多波束地形资料上识别出来,因此绘制海底高精度地形是初识大洋核杂岩的关键(Blackman *et al.*, 2009)。

此外,大洋核杂岩常出露在洋脊与转换断层组成的内角处(Ranero and Reston, 1999),部分大洋核杂岩可能出露在离洋脊稍远的地方,代表不同期次的拆离断层活动。掌握这些信息将有助于在地形资料中初步识别大洋核杂岩的可能位置。

4.2 重力特征

重力测量可以反映出地下地质体的综合密度分布信息,上地壳玄武岩的密度一般为 $2.4 \times 10^3 \sim 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,辉长岩密度为 $2.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,地幔橄榄岩密度为 $3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。经典的层状洋壳模型,即 Penrose 模型,一般包括 1.5~2.0 km 的玄武岩上地壳,其下为约 4 km 的辉长岩,海平面以下 6~7 km 主要以地幔橄榄岩为主。而大洋核杂岩则直接将辉长岩和地幔橄榄岩出露到海底,与正常洋壳形成明显的密度差异,因而比较容易在重力异常特征上反映出来(Blackman *et al.*, 2009)。需要注意的是,橄榄岩出露到海底容易发生水化反应,其实际密度与蛇纹石化程度密切相关,完全蛇纹石化后形成的蛇纹岩密度将减小到 $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

大洋核杂岩相对周边的正常洋壳具有较高的残余地幔布格异常(RMBA),显示较薄的洋壳(Tucholke *et al.*, 1998)(图 3a)。自由空气重力异常一般对应高值区,显示地形一般相对较高,且从断层的拆离起点到拆离末端,重力有变高的趋势,表明靠近拆离末端有更高密度的岩石出露,FUJI Dome 和 At-

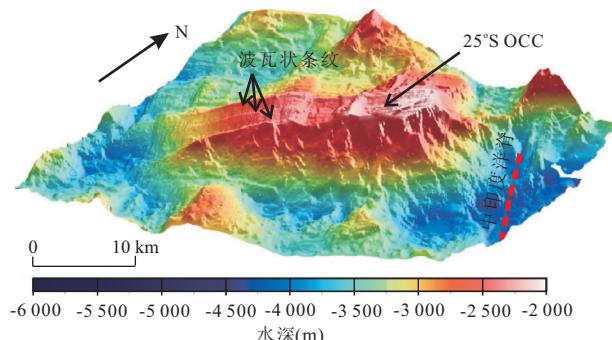


图 2 中印度洋脊 25°S 大洋核杂岩三维地形地貌特征(Morisita *et al.*, 2009)

Fig.2 The topography of 25°S oceanic core complex along Central Indian Ridge

lantis Massif 都显示类似的重力异常特征(Searle *et al.*, 2003; Blackman *et al.*, 2008)。

4.3 磁力特征

磁力测量在地质勘探中具有多种应用,可以利用磁力相关的各种参数来研究地质体,如磁场强度、磁化强度、磁化率、地磁异常、古地磁等。对于大洋核杂岩的研究,磁力测量可以提供三方面的帮助,如磁异常条带特征、原生剩磁的扰动信息和岩石的固有磁化强度。在大洋核杂岩出现的地方磁异常条带一般线性比较差且不连续,洋脊两侧的磁条带间距不对称,如大西洋中脊 14°~16°N 的大洋核杂岩(Fujiwara *et al.*, 2003; Okino *et al.*, 2004)。受拆离断层影响,岩石块体发生位移或旋转,通过古地磁测量获取原生剩磁,可以揭示岩石块体成岩后经历的构造活动,如西南印度洋脊 Atlantis Bank、大西洋中脊 Atlantis Massif 和 15° 45' N 大洋核杂岩(Dick *et al.*, 1999; Kelemen *et al.*, 2004; Blackman *et al.*, 2006)。不同岩石类型具有不同的磁化强度,橄榄岩发生蛇纹石化生成磁铁矿,使其具有较高的磁化强度,区别于玄武岩(图 3b)。通过磁化强度的测量,可以描绘大洋核杂岩的岩相分布(Okino *et al.*, 2004; Blackman *et al.*, 2009)。

4.4 地震

地震探测对大洋核杂岩的识别也具有重要意义,无论是天然地震,还是人工地震方法。利用水下声学监测系统对大西洋中脊的微地震观察,发现大洋核杂岩区往往有较强烈的地震活动(Smith *et al.*, 2003)。这些地区微地震较频繁,震源深度一般在海平面以下 3~7 km,且震源多沿拆离断层分布(Smith *et al.*, 2003; deMartin *et al.*, 2007; Es-cartin *et al.*, 2008),如图 4。

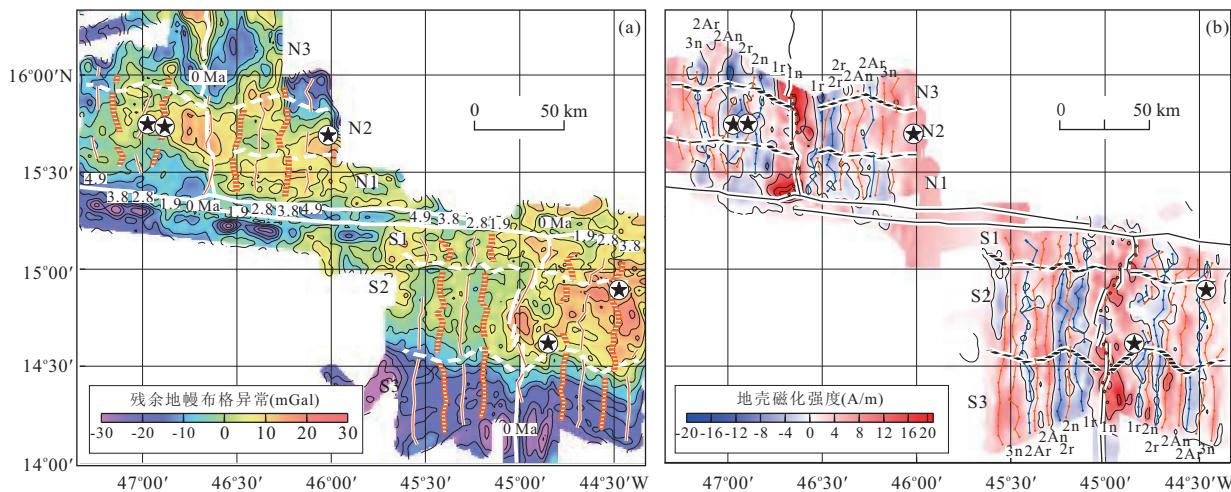


图 3 大西洋中脊 $15^{\circ}20'N$ 断裂带附近的残余地幔布格异常(a)和地壳磁化强度(b)(Fujiwara *et al.*, 2003)

Fig.3 Residual mantle Bouguer anomaly (a) and crustal magnetization calculated from magnetic anomaly (b) of the area near the fifteen-twenty fracture zone, mid-Atlantic ridge

星号代表大洋核杂岩出露地点;横向虚线代表洋脊分段界线;N1、S1 等为洋脊段号;a 图中的磁条带年龄数值为 Ma;b 图中 1r、2n 等代表磁异常条带;n 代表正极性;r 代表负极性

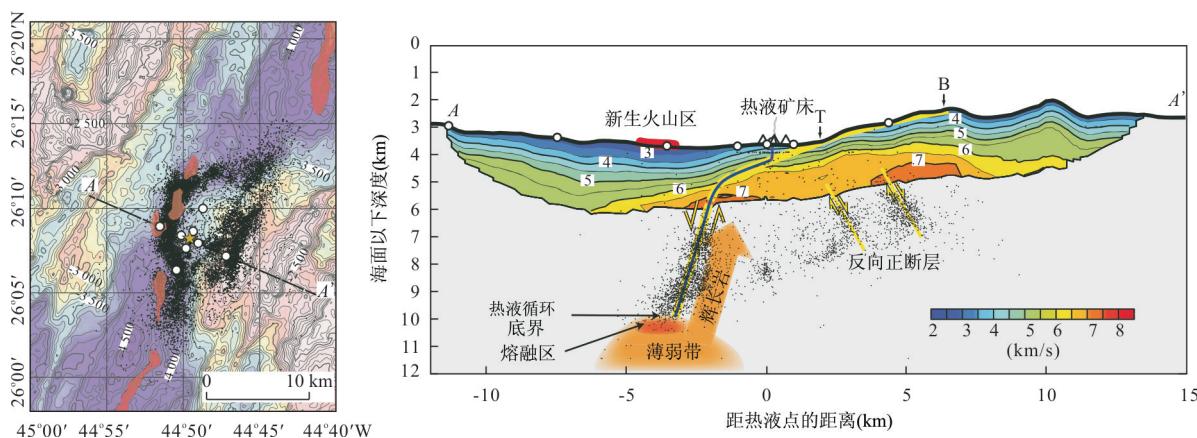


图 4 大西洋中脊 TAG 区微地震震中平面分布和 P 波速度模型(deMartin *et al.*, 2007)

Fig.4 Locations of microearthquake epicenters and P -wave velocity model at TAG segment along mid-Atlantic ridge
左图中小黑点代表微地震震中;棕色五角星代表 TAG 活动热液喷口;白色圈代表 OBS 布站位置;红色区块代表新生火山区;AA' 为右图剖面线位置.右图中黄色线代表拆离断层及反向正断层的可能展布

人工地震探测可以使用多种参数或方法来识别大洋核杂岩,如一维地震波速剖面、层析成像、多道地震反射剖面等(Dannowski *et al.*, 2010).大洋核杂岩主要由辉长岩(波速大于 6.0 km/s)和地幔橄榄岩(波速大于 7.5 km/s)出露到海底形成,因此其浅层一般显示较高的 P 波速度,如 Atlantis Massif 的中央穹隆区、Dante's Domes 南部穹隆区和 Kane 大洋核杂岩的 Babel 和 Cain 穹隆区(Blackman *et al.*, 2009).当然岩石类型和地震波速的对应关系并不唯一,蛇纹石化橄榄岩可能会具有与辉长岩相同的速度,断层裂隙的出现也会极大地削弱地震波速.多道

反射地震资料可以揭示大洋核杂岩浅部的地震结构信息(Canales *et al.*, 2008).

4.5 岩性

判别大洋核杂岩最直接的方法是从岩性上来鉴别,大洋核杂岩的“核”即指地幔橄榄岩、辉长岩.此外还有与拆离断层作用相关的构造岩类,如糜棱岩、绿泥石化角砾岩、微角砾岩、断层角砾和断层泥等(楼法生等,2005).表 1 展示了典型的大洋核杂岩所包含的岩石类型,从中可以看出,一般大洋核杂岩都含有橄榄岩、辉长岩等,包括蛇纹石化橄榄岩和蛇纹岩,以及蚀变的辉长岩.

准确识别大洋核杂岩的存在,需要基于多种数据资料的综合分析,如高分辨率的侧扫声呐图像、精细的海底多波束地形、利用深拖摄像或 ROV 等进行直接海底观察、重力、磁力和地震异常探测以及海底露头地质采样和钻探取样等(Blackman *et al.*, 2002)。

5 新海底扩张模式的意义及研究展望

以拆离断层和大洋核杂岩为主要特征的新海底扩张模式被学界称为岩石圈增生的 Chapman 模式(Canales and Escartin, 2010)(图 5)。新海底扩张模式的发现不但丰富和完善了板块扩张理论,还为认识大洋岩石圈的结构和组成、洋中脊区地壳增生过程、熔体生成及运移、应力局域化和地幔流、壳幔相互作用以及地球深部动力学提供了新的窗口,为认识地球生命的起源以及太阳系中其他星球的生命存在条件提供一种新的思路和解决途径(Canales and Escartin, 2010)。

未来,有关新的海底扩张模式的探索仍将继续,众多科学难题和细节亟待解决和发现,比如拆离断层如何形成,其初始动力是什么? 拆离断层在深部的几何形态,蚀变作用的影响范围? 在什么样的条件下引起大洋核杂岩的形成和发育? 在大洋核杂岩发育过程中,维持和推进长期的应变局部化的机制和条件是什么? 大洋和大陆拆离断层之间有什么异同? 大陆核杂岩的形成、大陆裂解对大洋核杂岩及洋底扩张有何指示? 大洋核杂岩的岩相结构是怎样

的,在不同尺度上的变化如何? 大洋核杂岩体的规模、深部结构、丰度和分布,以及变形和岩浆侵入的关系如何? 大洋核杂岩和拆离断层中的热液循环驱动力是什么? 流体循环、变形和岩浆过程之间的响应如何? 与大洋核杂岩相关的生态系统的特征和生物多样性,以及如何与大洋核杂岩和拆离断层中的热液循环模式相联系? 与大洋核杂岩相对的另一侧岩石圈的结构和性质? Chapman 扩张模式和 Penrose 扩张模式在洋中脊段的时空耦合?

致谢:感谢中国科学院海洋研究所牛耀龄教授、中科院南海海洋研究所孙珍研究员等在“大洋核杂岩”中文翻译上的推敲和建议,感谢匿名评审人对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Bach, W., Rosner, M., Jöns, N., et al., 2011. Carbonate Veins Trace Seawater Circulation during Exhumation and Uplift of Mantle Rock: Results from ODP Leg 209. *Earth and Planetary Science Letters*, 311(3–4): 242–252. doi:10.1016/j.epsl.2011.09.021
- Baines, A.G., Cheadle, M.J., Dick, H.J.B., et al., 2003. Mechanism for Generating the Anomalous Uplift of Oceanic Core Complexes: Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge. *Geology*, 31 (12): 1105–1108. doi: 10.1130/G19829.1
- Blackman, D.K., Canales, J.P., Harding, A., 2009. Geophysical Signatures of Oceanic Core Complexes. *Geophysical Journal International*, 178(2): 593–613. doi: 10.1111/j.1365–246X.2009.04184.X
- Blackman, D.K., Cann, J.R., Janssen, B., et al., 1998. Origin of Extensional Core Complexes: Evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. *J. Geophys. Res.*, 103(B9): 21315–21333. doi:10.1029/98JB01756
- Blackman, D. K., Ildefonse, B., John, B. E., et al., 2006. Oceanic Core Complex Formation, in Atlantis Massif, Vol. 304/305. Ocean Drilling Program College Station, TX.
- Blackman, D. K., Karner, G., Searle, R. C., 2008. Three-Dimensional Structure of Oceanic Core Complexes: Effects on Gravity Signature and Ridge Flank Morphology, Mid-Atlantic Ridge 30°N. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(6): Q06007. doi:10.1029/2008GC001951
- Blackman, D.K., Karson, J.A., Kelley, D.S., et al., 2002. Geology of the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30°N): Implications for the Evolution of an Ultramafic Oceanic Core Complex. *Marine Geophysical Researches*, 23(5–6): 443–469. doi:10.1023/B:MARI.0000018232.14085.75
-

图 5 以拆离断层和大洋核杂岩为特征的 Chapman 模式(Canales and Escartin, 2010)

Fig.5 Cartoon showing the ‘Chapman model’ of sea floor spreading featured in detachment fault and oceanic core complexes

- Canales, J. P., Escartin, J., 2010. Detachments in Oceanic Lithosphere: Deformation, Magmatism, Fluid Flow, and Ecosystems. Chapman Conference Report, Cyprus.
- Canales, J.P., Sohn, R.A., deMartin, B.J., 2007. Crustal Structure of the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) Segment (Mid-Atlantic Ridge, 26° 10' N): Implications for the Nature of Hydrothermal Circulation and Detachment Faulting at Slow Spreading Ridges. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 8(8):Q08004.doi:10.1029/2007GC001629
- Canales, J.P., Tucholke, B.E., Collins, J.A., 2004. Seismic Reflection Imaging of an Oceanic Detachment Fault: Atlantis Megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30° 10' N). *Earth and Planetary Science Letters*, 222 (2): 543—560.doi:10.1016/j.epsl.2004.02.023
- Canales, J. P., Tucholke, B. E., Xu, M., et al., 2008. Seismic Evidence for Large-Scale Compositional Heterogeneity of Oceanic Core Complexes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(8):Q8002.doi:10.1029/2008GC002009
- Cann, J.R., Blackman, D.K., Smith, D.K., et al., 1997. Corrugated Slip Surfaces Formed at Ridge-Transform Intersections on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 385 (6614): 329—332.doi:10.1038/385329a0
- Cheadle, M., Grimes, C., 2010. To Fault or not to Fault. *Nature Geoscience*, 3(7):454—456.
- Christie, D. M., West, B. P., Pyle, D. G., et al., 1998. Chaotic topography, mantle flow and mantle migration in the Australian-Antarctic discordance. *Nature*, 394: 637—644.doi:10.1038/29226
- Dannowski, A., Greve, I., Ranero, C. R., et al., 2010. Seismic Structure of an Oceanic Core Complex at the Mid-Atlantic Ridge, 22° 19' N. *J. Geophys. Res.*, 115 (B7):B7106.doi:10.1029/2009JB006943
- Davis, G. A., 1988. Rapid Upward Transport of Mid-Crustal Mylonitic Gneisses in the Footwall of a Miocene Detachment Fault, Whipple Mountains, Southeastern California. *Geologische Rundschau*, 77(1):191—209.doi:10.1007/BF0184868
- Davis, G. H., Coney, P. J., 1979. Geologic Development of the Cordilleran Metamorphic Core Complexes. *Geology*, 7 (3):120—124.doi:10.1130/0091-7613(1979)7<120:GDOTCM>2.0.CO;2
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., Kluth, C. F., 1996. Structural Geology of Rocks and Regions, 2nd Edition. John Wiley and Sons Inc, New York.
- deMartin, B.J., Sohn, R. A., Canales, J.P., et al., 2007. Kinematics and Geometry of Active Detachment Faulting Beneath the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) Hydrothermal Field on the Mid-Atlantic Ridge. *Geology*, 35 (8):711—714.doi:10.1130/G23718A.1
- Dick, H. J. B., Bryan, W. B., Thompson, G., 1981. Low-Angle Faulting and Steady-State Emplacement of Plutonic Rocks at Ridge-Transform Intersections: Eos, Transactions. American Geophysical Union, Washington D.C..
- Dick, H. J. B., Natland, J. H., Alt, J. C., et al., 2000. A Long in Situ Section of the Lower Ocean Crust: Results of ODP Leg 176 Drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(1):31—51.doi:10.1016/S0012-821X(00)00102-3
- Dick, H. J. B., Natland, J. H., Miller, D. J., et al., 1999. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Leg 176 Summary. ODP College Station, TX.
- Escartin, J., Cowie, P. A., Searle, R. C., et al., 1999. Quantifying Tectonic Strain and Magmatic Accretion at a Slow Spreading Ridge Segment, Mid-Atlantic Ridge, 29°N. *J. Geophys. Res.*, 104 (B5): 10421—10437.doi:10.1029/1998JB900097
- Escartin, J., Smith, D. K., Cann, J., et al., 2008. Central Role of Detachment Faults in Accretion of Slow-Spreading Oceanic Lithosphere. *Nature*, 455(7214):790—794.doi:10.1038/nature07333
- Fossen, H., 1992. The Role of Extensional Tectonics in the Caledonides of South Norway. *Journal of Structural Geology*, 14 (8—9): 1033—1046.doi:10.1016/0191-8141(92)90034-T
- Fujiwara, T., Lin, J., Matsumoto, T., et al., 2003. Crustal Evolution of the Mid-Atlantic Ridge near the Fifteen-Twenty Fracture Zone in the Last 5 Ma. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(3):1024.doi:10.1029/2002GC000364
- Gebelin, A., Mulch, A., Teyssier, C., et al., 2011. Oligo-Miocene Extensional Tectonics and Fluid Flow across the Northern Snake Range Detachment System, Nevada. *Tectonics*, 30 (5): 1—18. doi: 10.1029/2010TC002797
- Hess, H. H., 1962. History of Ocean Basins. In: Engel, A. E. J., James, H. L., Leonard, B. F., eds., Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington. Geological Society of America, Boulder, 599—620.
- Ildefonse, B., Blackman, D. K., John, B. E., et al., 2007. Oceanic Core Complexes and Crustal Accretion at Slow-Spreading Ridges. *Geology*, 35 (7): 623—626. doi: 10.1130/G23531A.1
- Karson, J. A., Dick, H., 1983. Tectonics of Ridge-Transform Intersections at the Kane Fracture Zone. *Marine Geophysical Research*, 6 (1): 51—98. doi: 10.1007/BF00300398
- Kelemen, P. B., Kikawa, E., Miller, D. J., et al., 2004. Proceed-

- ings of the ODP, Initial Reports 209. Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1268–1275.
- Li, S. Z., Lv, H. Q., Hou, F. H., et al., 2006. Oceanic Core Complex. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26 (1): 47–52 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. X., Xie, G. G., 1996. An Outline of Metamorphic Core Complex. *Geology of Jiangxi*, 10(2): 149–159 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. M., Li, D. W., 2003. Detachment Faults in Dingjie Area, Middle Segment of Himalayan Orogenic Belt. *Geotectonica et Metallogenesis*, 27(1): 37–42 (in Chinese with English abstract).
- Lou, F. S., Shu, L. S., Wang, D. Z., 2005. Recent Progress in Study of Metamorphic Core Complex. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 67–76 (in Chinese with English abstract).
- MacLeod, C. J., Escartin, J., Banerji, D., et al., 2002. Direct Geological Evidence for Oceanic Detachment Faulting: The Mid-Atlantic Ridge, 15° 45' N. *Geology*, 30(10): 879–882. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0879:DGEFOD>2.0.CO;2
- Martinez, F., Karsten, J., Klein, E. M., 1998. Recent Kinematics and Tectonics of the Chile Ridge, *Eos Trans. Am. Geophys. Un.*, 79(45): F836.
- McCaig, A. M., Cliff, R. A., Escartin, J., et al., 2007. Oceanic Detachment Faults Focus Very Large Volumes of Black Smoker Fluids. *Geology*, 35(10), 935–938. doi: 10.1130/G23657A.1
- McCaig, A. M., Delacour, A., Fallick, A. E., et al., 2010. Detachment Fault Control on Hydrothermal Circulation Systems: Interpreting the Subsurface beneath the TAG Hydrothermal Field Using the Isotopic and Geological Evolution of Oceanic Core Complexes in the Atlantic. In: Rona, P. A., Devey, C. W., Dyment, J., et al., eds., *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. American Geophysical Union, Washington, D.C..
- McKnight, A. R., 2001. Structure and Evolution of an Oceanic Megamullion on the Mid-Atlantic ridge at 27° N (Dissertation). Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, Cambridge.
- Miller, E. L., Gans, P. B., 1983. The Snake Range Decollement Interpreted as a Major Extensional Shear Zone. *Tectonics*, 2(3): 239–263. doi: 10.1029/TC003i006p00647
- Miranda, J. M., Silva, P. F., Lourenco, N., et al., 2002. Study of the Saldanha Massif (MAR, 36° 34' N): Constraints from Rock Magnetic and Geophysical Data. *Mar. Geophys. Res.*, 23(4), 299–318. doi: 10.1023/A:1025711502122
- Mitchell, N. C., Escartin, J., Allerton, S., 1998. Detachment Faults at Mid-Ocean Ridges Garner Interest. *Eos, Trans. AGU*, 79(10): 127. doi: 10.1029/98EO00095
- Morishita, T., Hara, K., Nakamura, K., et al., 2009. Igneous, Alteration and Exhumation Processes Recorded in Abyssal Peridotites and Related Fault Rocks from an Oceanic Core Complex along the Central Indian Ridge. *Journal of Petrology*, 50(7): 1299–1325. doi: 10.1093/petrology/egp025
- Nakamura, K., Morishita, T., Bach, W., et al., 2009. Serpentinized Troctolites Exposed near the Kairei Hydrothermal Field, Central Indian Ridge: Insights into the Origin of the Kairei Hydrothermal Fluid Supporting a Unique Microbial Ecosystem. *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1–4): 128–136. doi: 10.1016/j.epsl.2009.01.024
- Nooner, S. L., Sasagawa, G. S., Blackman, D. K., et al., 2003. Structure of Oceanic Core Complexes: Constraints from Seafloor Gravity Measurements Made at the Atlantis Massif. *Geophysical Research Letter*, 30(8): 1446. doi: 10.1029/2003GL017126
- Ohara, Y., Yoshida, T., Kato, Y., et al., 2001. Giant Megamullion in the Parece Vela Backarc Basin. *Marine Geophysical Research*, 22(1): 47–61. doi: 10.1023/A:1004818225642
- Ohara, Y., Okino, K., Snow, J. E., 2011. Tectonics of Unusual Crustal Accretion in the Parece Vela Basin. In: Ogawa, Y., Anma, R., Dilek, Y., eds., *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin, Modern Approaches in Solid Earth Sciences*. Springer, Netherlands, 8: 149–168.
- Okino, K., Matsuda, K., Christie, D. M., et al., 2004. Development of Oceanic Detachment and Asymmetric Spreading at the Australian-Antarctic Discordance. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5(12): Q12012. doi: 10.1029/2004GC000793
- Ranero, C. R., Reston, T. J., 1999. Detachment Faulting at Ocean Core Complexes. *Geology*, 27(11): 983–986. doi: 10.1130/0091-7613(1999)027<0983:DFAOCC>2.3.CO;2
- Ray, D., Misra, S., Banejee, R., et al., 2011. Geochemical Implications of Gabbro from the Slow-Spreading Northern Central Indian Ocean Ridge, Indian Ocean. *Geological Magazine*, 148(3): 404–422.
- Reston, T. J., Weinrebe, W., Grevemeyer, I., et al., 2002. A Rifted inside Corner Massif on the Mid-Atlantic Ridge at 5° S. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 200(3–4): 255–269.

- doi:10.1016/S0012-821X(02)00636-2
- Sauter, D., Cannat, M., Mendel, V., 2008. Magnetization of 0–26.5 Ma Seafloor at the Ultraslow-Spreading Southwest Indian Ridge 61°–67°E. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(4): Q04002. doi:10.1029/2007GC001764
- Searle, R. C., Cannat, M., Fujioka, K., et al., 2003. FUJI Dome: A Large Detachment Fault near 64°E on the Very Slow-Spreading Southwest Indian Ridge. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4 (8): 9105. doi: 10.1029/2003GC000519
- Shen, L., Liu, J.L., Hu, L., et al., 2011. The Dayingzi Detachment Fault System in Liaodong Peninsula and Its Regional Tectonic Significance. *Science in China (Ser.D)*, 41(4): 437–451 (in Chinese).
- Sichel, S.E., Esperança, S., Motoki, A., et al., 2008. Geophysical and Geochemical Evidence for Cold Upper Mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1): 69–86. doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100006
- Smith, D.K., Escartin, J., Cannat, M., et al., 2003. Spatial and Temporal Distribution of Seismicity along the Northern mid-Atlantic Ridge (15°–35°N). *J. Geophys. Res.*, 108(B3): 2167. doi:10.1029/2002JB001964
- Steinfeld, R., Rhein, M., Brandt, P., et al., 2009. Oceanography, Geology and Geophysics of the South Equatorial Atlantic: Cruise No. 62, June 24–December 30, 2004, Ponta Delgada (Portugal)–Walvis Bay (Namibia). Universität Hamburg, Leitstelle Meteor/Merian.
- Tucholke, B.E., Behn, M.D., Buck, W.R., et al., 2008. Role of Melt Supply in Oceanic Detachment Faulting and Formation of Megamullions. *Geology*, 36(6): 455–458. doi: 10.1130/G24639A.1
- Tucholke, B.E., Lin, J., Kleinrock, M.C., 1998. Megamullions and Mullion Structure Defining Oceanic Metamorphic Core Complexes on the Mid-Atlantic Ridge. *J. Geophys. Res.*, 103(B5): 9857–9866. doi:10.1029/98JB00167
- Yao, L.J., Yan, D.P., Hu, L., 2007. Structure Style and Temperature-Pressure Estimation of the Detachment Fault Zone around Fangshan Dome, Western Hills of Beijing. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 357–365 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.D., Zhang, Q., 1993. The Yagan Metamorphic Core Complex and Extensional Detachment Fault in Inner Mongolia. *Acta Geological Sinica*, 67(4): 301–309 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李三忠,吕海青,侯方辉,等,2006.海洋核杂岩.海洋地质与第四纪地质,26 (1):47–52.
- 李武显,谢国刚,1996.变质核杂岩概述.江西地质,10(2): 149–159.
- 刘德民,李德威,2003.喜马拉雅造山带中段定结地区拆离断层.大地构造与成矿学,27(1):37–42.
- 楼法生,舒良树,王德滋,2005.变质核杂岩研究进展.高校地质学报,11(1):67–76.
- 申亮,刘俊来,胡玲,等,2011.辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义.中国科学(D辑),41(4):437–451.
- 姚丽景,颜丹平,胡玲,2007.房山变质核杂岩基底拆离断层韧性剪切变形构造及环境分析.地球科学——中国地学报,32(3):357–365.
- 郑亚东,张青,1993.内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层.地质学报,67(4):301–309.