三联点研究进展

孙转¹⁾,杨风丽²⁾,张娜²⁾,王仔轩¹⁾,王文艳³⁾

1)中国石油辽河油田公司,辽宁盘锦,124010;2)同济大学海洋与地球科学学院,上海,200092;
3)中海石油(中国)上海分公司,上海,200030

内容提要:三联点(Triple Junction)是指3个板块边界(离散型、聚敛型和剪切型)的交汇处。三联点最早的认识 是源于板块构造,由于其构造的特殊性,三联点的研究为我们提供了一个很好的研究板块构造的窗口。不同的三联 点形状或类型指示着不同的大地构造环境及运动历史,同时它对油气的资源效应也产生了较大影响。本文论述了 三联点概念的演变、类型、识别、演化过程、定量描述与模拟方面的进展,并对三联点产生的油气资源效应也进行了 分析,最后对三联点的研究发展方向进行了展望。

关键词:三联点;识别;演化;模拟;展望

三联点(Triple Junction)是指任意3个板块边 界 [离 散 型 (ridge)、聚 敛 型 (trench) 和 剪 切 型 (transform fault)]的交汇处。自 Mckenzie 和 Morgan (1969)首次详细论述此概念以来,众多学者开展了 这项研究。例如, York (1973) 针对 Mckenzie 和 Morgan (1969) 三联点分类做了补充说明; York (1973)单纯针对地幔柱成因的三联点对板块构造 的指示意义做了分析: Pichon 和 Huchon(1987)、Ligi 等(1999)、Bird 等(1999)、Tesfaye 等(2003)利用不 同手段,研究了不同类型的三联点的演化过程; Carracedo (1994)、Georgen 和 Lin J (2002)、Walter (2003)、Geyer 和 Marti(2010)从几何模型、物理模 拟、应力场模拟,以及热场模拟等方面对三联点的发 育过程进行了定量或者半定量化的模拟;Fossen 等 (2009)结合实际三联点构造背景,分析了构造演化 过程对油气效应的影响。国内专家也对已发现的三 联点进行了不同程度的构造演化分析与研究,如田 勤俭和丁国瑜(1998)、李松林和赖晓玲(2006)分析 了青藏高原东北缘疑似三联点构造特征;左仁广和 汪新庆(2004)针对不同三联点的地质模型进行了 初步的研究探讨。

本文调研和综述了国内外关于三联点的研究进展,分析和阐述了在不同方面研究和应用中所采用的技术、方法,最后展望了三联点研究的发展趋势。

1 三联点研究进展

1.1 概念的提出

对三联点的最早认识源于板块构造,认为地幔 柱在板块运动中起着驱动力的作用。因此三联点传 统上被认为是3个离散边界或者是张裂裂谷的交汇 处,即伴随着地幔柱上涌,在巨大岩石圈穹窿上,沿 大致成120°交角的3支三叉裂谷系,推测是因为这 样需要最小力(Burke and Dewey, 1973)。最早详细 论述三联点概念的学术论文是 McKenzie 和 Morgan (1969)的《The evolution of triple junction》,文中根据 3种板块边界类型和每一个边界的受力状况将三联 点分为16种类型,即RRR、TTT(a)、TTT(b)、FFF、 RRT_RRF_TTR(a)_TTR(b)_TTR(c)_TTF(a)_TTF (b)、TTF(c)、FFR、FFT、RTF(a)和 RTF(b)型(表 1),并且根据其稳定性进一步又划分为稳定型和不 稳定型两种。稳定型三联点是指在不同地质历史时 期的发展过程中该三联点的几何特征不会随着时间 而改变,即一个稳定的三联点在各个不同的地质历 史时期都应该保持相同的几何形状,而不稳定的三 联点则会改变其形状或类型等,同时认为在16种可 能的三联点中有14种在特定的情况下会达到稳定 的状况,只有 FFF 和 RRF 型三联点在任何状况下都 无法达到稳定状态。

收稿日期:2011-11-15;改回日期:2012-3-20;责任编辑:黄敏。

作者简介:孙转, 女,1986年生。硕士研究生,海洋地质专业。通讯地址:124010,盘锦市石油大街 95 号辽河油田勘探开发研究院。 Email: sun_zhuan2008@163.com。

表 1 所有可能存在三联点的几何形状和稳定性 Table 1 The geometry and stability of all possible triple junctions





注:虚线 ab、bc、ac 分别表示三支边界速度向量脱离 AB、BC、AC 三支边界的几何形状形成的速度三角形,只有 ab、bc、ac 在同一点相交的三联点才是稳定的,这种情况通常在 RRR 型三联点才有发生,其他类型的三联点已被证实通常是不稳定的(Mckenzie and Morgan, 1969)

Dashed lines ab, bc, and ac in the velocity triangles join points the vector celocities of which leave the geometry of AB, BC and AC, respectively, unchanged. The relevant junctions are stable only if ab, bc and ac meet at a point. This condiction is always satisfied by RRR; in other cases the general velocity tringles are drawn to demonstrate instability. Several of the examples are culative(Mckenzie and Morgan, 1969)

之后,随着研究的进一步深化,谈到三联点所处 洋壳和陆壳特征,几乎都不可避免地涉及到三联点 的构造轨迹、结构类型、几何学、运动学、稳定性和不 稳定性特征等方面。Pichon 和 Huchon(1987)指出 McKenzie 和 Morgan(1969) 对三联点运动特征的论 述是不全面的,只考虑了正切平面下的三联点,忽视 了下沉板块之间的三维相互作用。York(1973)的 研究认为,除了 McKenzie 和 Morgan(1969)提出的 14 种外,在适当的条件下有 15 种会达到稳定状况, 如当 RRF 型三联点在两个 Ridge 垂直相交的时候, 或者说只有当 ab 在图中穿过速度三角形 ABC 的外 心时才可以达到稳定状态(图1)。

目前世界上已发现存在的三联点有:TTT-Boso 三联点; FFF 型—Karliova 三联点; TTR 型—Chile Aleutian) 三联点; RFF 型—Queen Charlotte 三联点、 Bouvet 三联点; RRF 型—Macquarie Triple 三联点; FFF 型—Mendocino 三联点; RRR 型—Afar 三联点、 Azores 三联点、Galapagos 三联点、Rivera 三联点、 Rodrigues 三联点、Tongareva 三联点等。在中国大陆 内部有很多似三联点构造,如海原一银川附近、西 安、临汾附近、焦作一新乡附近、鲜水河一龙门山附 近、北京附近、渤海湾附近等(田勤俭和丁国瑜, 1998;李松林和赖晓玲,2006)。

1.2 三联点的识别及描述

三联点轨迹的组合形态主要以"丁"字形和 "人"字形为主,各要素的具体展布形态与组合取决





Fig. 1 Example of a stable RRF triple junction along with its velocity triangle. The two ridges meet at right angles. J is the representative point of the triple 个裂谷破裂相交形成的 RRR 型三联点形 junction (York, 1973)

于3个板块边界的几何相容性和板块运动的相互补 偿协调(Babuska et al., 2008)。目前对三联点的识 别有很多种方法,如根据地表对不同时间尺度构造 作用的响应、地震成像技术、全球定位系统以及长期 的地质记录等。例如,红河一亚丁湾一东非裂谷可 以直观地看到一个几何三联点的破裂形状 (Bhattacharji and Koide, 1975);Tenerife 岛上因火山 岩的分布,结合动力学等推测的三联点(Carracedo, 1994):根据后期沉积物的快速沉积、地形测量、小 型的河流被隆起切断改道,以及地震成像等方法识 别出 Mendocino 三联点(Lock et al., 2006; Lourenco et al., 1998);通过断裂带分布识别出的青藏高原 北隅三联点(田勤俭和丁国瑜,1998);通过缝合线 的识别发现的东秦岭三联点(杨宗让,1998)等。目 前随着水深测量、人工地震、重力、磁力等地球物理 技术的发展和广泛应用,对三联点的识别有了更直 接和简便的方法,不但使得三联点构造在一定程度 上能够更直观地展现出来(图2)(Seno and Takano, 1989; Bird et al., 1999; West et al., 1995; Fernandes et al., 2004; Lock et al., 2006; Schouten et al., 2008),并且对三联点板块边界的确定起着 越来越重要的作用。

对三联点的描述主要牵扯到板块边界与相对旋 转和移动速度的方向和大小。获取这些变量的方法 有多种。例如,如果有新的洋壳产生,板块移动的速 度矢量就可以通过磁条带来确定,同时也可以确定 板块的边界;如果是转换断层边界,板块的速度方向

> 应该平行于断层的延伸方向。当然,最常 用的确定板块边界的方法还是通过天然 地震的分布情况,同时天然地震还可以确 定板块的运动方向和板块之间相对运动 速度的大小(McKenzie and Morgan, 1969; McKenzie, 1970; Seno and Takano, 1989; Tesfave et al.,2003)。目前随着 GPS 活动 网络的发展,使得对于地质研究对象长期 不间断的检测成为现实,并且可以进行时 间和空间的横向和纵向对比,使得对板块 运动定量描述的详细程度和可靠程度都 大幅度地提高 (Selvans et al., 2010)。

1.3 三联点的发育及演化过程

由于岩石圈下伏软流圈的上涌导致3 成机制和演化的特殊性,对它的研究也最 为广泛。它们由地幔底辟上拱产生,属主



图 2 (a)—Rodrigues 三联点水深测量数据;(b)—Pacific—Farallon—Phoenix 三联点磁力图 Fig. 2 (a)—Bathymetry data of Rodrigues triple junction area; (b)—magnetic anomalies of Pacific—Farallon—Phoenixtriple junction area

动型裂谷。其中两支进一步发展成为大洋,第三支 夭折成为坳拉谷,并且坳拉谷与新生洋盆、被动大陆 边缘相连,但是当洋盆发生俯冲作用,继而使被动大 陆边缘演化为碰撞造山带的一部分时,先前的衰退 裂谷成为自造山带伸向大陆内克拉通内部的拗拉 槽。衰退裂谷一般位于被动大陆边缘的凹角处 (York,1973)。有的衰退谷只表现为一个有碱性物 质侵入的一条缝合线,有的会有复杂的沉积充填、火 山活动或经历复杂的构造改造(Hyndman and Hamilton, 1993; Briais, 1995)。在新生洋盆的扩张 过程中,衰退裂谷不再发生裂陷沉降而发生热沉降, 并可能成为大陆地区的物源输入大陆边缘的通道。 在洋盆俯冲消减直至发生大陆碰撞的过程中,衰退 裂谷还有可能发生一些轻微的挤压构造作用。世界 上很多大河都沿着衰退的裂谷流入大海,它们携带 的三角洲沉积物的楔入扩大了裂谷的范围(York, 1973)。新的裂谷经常形成于老的裂谷的重新活 化,如大西洋在中生代的张裂是在早古生代发生过 张裂,在晚古生代又闭合的构造基础上发生的 (Wilson, 1966)。新的裂谷或者沿着海洋关闭的缝 合线继续发展,这种现象往往是因为裂谷或缝合线 伸张透过大陆岩石圈的薄弱带和地幔柱相连产生 (Burke and Dewey, 1973)_{\circ}.

三联点的演化涉及到洋脊的相互伸展增殖、干

扰及板块运动(方向和速率)的变化过程,三联点的 动态演化既可能改变三联点的结构形态和运动状 态,也可能改变其结构类型(Apotria and Gray, 1985; Jarvis and Kroenke, 1993)。例如,大西洋的 张裂开始于南美和非洲板块,在现今的几内亚湾形 成一个 RRR 型三联点,北西向的 Benue 裂谷是这个 三联点消亡的一支(Petters, 1978)等。同时,研究 还发现,并不是所有的 RRR 型三联点都要有热点或 者是软流圈地幔的存在,而且热点的位置或者软流 圈地幔不一定都恰好位于 RRR 型三联点的交汇处 (Bhattacharji and Koide, 1975),如红河亚丁湾在形 成初期是一个 FFR 型的三联点,它是由于在红海裂 谷北部末端有斜向狭长的火山物质沿着裂谷上涌产 生的应力作用,使得红河裂谷末端分叉为两个剪切 带,即苏伊士海湾剪切带和亚喀巴湾剪切带,使得早 期的 FFR 型三联点转化为 FRR 型,并最终演化为 RRR 型,或者直接从 FFR 型演化为 RRR 型三联点 (Bhattacharji and Koide, 1975), 而不是像 York (1973)解释的由于热点在三联点中心上涌形成的 RRR 型三联点。

还如 Bouvet 三联点从形成至今,经历过从 RFF—RRF—RRR—RFF—RRR 的演化过程(Ligi et al., 1999)。由于 Bouvet 三联点构造演化的复杂 性,也有学者提出 Bouvet 三联点既不是简单的 RFF 型也不是简单的 RRR 型三联点, 而是复杂的综合型 三联点, 它在区域上属于 RRR 型, 在交汇域则表现 为以转换断层连接为主, 故有的学者称其为 RFF 型 (Apotria and Gray, 1985; Munschy and Schlich, 1989), 有的学者称其为不规则 RRR 型(Mitchell and Livermore, 1998; Migdisova et al., 2010)。还有 的三联点的位置会随着构造演化迁移, 如 Afar 三联 点(Tesfaye et al., 2003)和 Tongareva 三联点等 (Larson et al., 2002)。三联点普遍存在随着地质 历史的迁移在空间上会在一个或多个板块上留存有 连续的迁移证据, 如日本 TTT 三联点、Galapagos 三 联点、Tongareva 三联点、Afar 三联点、Mendocino 三 联点等(Patriat and Parson, 1989; Tesfaye et al., 2003; Larson et al., 2002; Lock et al., 2006)。

有些三联点的交汇域处往往存在一个变形相对 微弱的微板块(microplate),并且它通常对3个大板 块边界的几何形态、变形强度和运动过程轨迹产生 影响,如 Galapagos 三联点、Bouvet 三联点、Pacific— Farallon—Phoenix 三联点和 Pacific—Antarctic— Nazca 三联点等 (Apotria and Gray, 1985; Searle and Francheteau, 1986; Ligi et al., 1999; Babuska and Plomerova, 2008)。Bouvet 三联点从侏罗纪形成至 白垩纪期间发生过多次幕式的裂谷隆起和微板块的 形成(Theodore and Norman, 1985; Ligi et al., 1999), 在149 Ma的时候 Bouvet 三联点是 RFF 性质的,在 123 Ma的时候在演化过程中出现了 Trinidad 微板 块,在122 Ma的时候在Trinidad 微板块周围出现了 数个裂谷隆起,其中一个隆起形成了 Magellan 微板 块(Tamaki and Larson, 1988),在120 Ma 的时候两 个板块都拼合在太平洋板块上, Bouvet 三联点演化 为 RRR 型 三 联 点, 并 且 位 置 "跳 跃"至 南 部 (Theodore and Norman, 1985)。又如,位于西波西米 亚地块的古三联点,由于相对集中的地幔火山作用 使得古三联点及微板块恢复运动,从而改变和控制 着三联点的迁移路径(Babuska and Plomerova, $2008)_{\circ}$

三联点的幕式变化、迁移过程、反复的裂缝传播 导致了微板块的形成、变大或者与周边板块的拼合。 三联点的几何形状在时间和空间上都变化较大。三 联点的位置迁移往往导致某些构造特征上的变化, 如死亡的转换断层、直接或者潜在弯曲的假断层 (straight and potentially curving pseudo faults)、以网 状存在的深海丘陵(abyssal-hill fabric)以及因裂缝 而发现的古微板块活动等。甚至有些运动学上认为 是稳定的三联点也会发生幕式的迁移(Bird et al., 1999; Gulick et al., 2001; Brunelli et al., 2003)。

1.4 模拟研究

国内外对三联点的模拟主要有数字模拟、物理 模拟、热模拟、应力场模拟等方面,但主要都是针对 地幔柱引起的 RRR 型三联点。用数学方法研究地 质问题首先要考虑的是地质数据自身的特点,以便 于建立数学模型,适合计算机对数据进行采集、存 储、加工处理等(左仁广和汪新庆,2004)。RRR 型 三联点因成因上的特殊性和简单性,是三联点问题 中物理机制最简单的一种,因而被较多地用来模拟。

最早进行有关 RRR 型三联点三维数字模拟的 是 Georgen 和 Lin J(2002),主要对发育在洋壳上 RRR 型三联点的地幔流和热结构特征进行了模拟。 针对洋壳上发育的 Rodrigues(RTJ)、Azores(ATJ)和 Galapagos (GTJ) 三联点特征, Georgen 和 Lin J (2002)首先忽略掉微板块等因素的影响,并依据统 计学的分析,找出三联点在几何上的相似性,简化出 一个简单的几何模型,并假设板块的速度矢量垂直 于每一支裂谷,大小等于裂谷张裂速度的一半。模 型的垂向边界和底部的边界速度条件设定为与深度 和离假设的裂谷轴的垂向距离有关的函数,然后使 用解析法,规定模型中每一个网格节点处于上升流 和水平流速度作用的结果。模型的顶底温度设为0 ~1350℃范围,水平温度梯度设为0℃/km。为了能 够研究地幔流和沿着每一支裂谷至少 1000km 长度 的热场,模型的大小为 2000km × 2000km × 200km, 离散为 41 × 41 × 15 的网格节点。在靠近三联点的 位置水平分辨率最高,靠近模型表面的速度和温度 梯度达到最高,同时垂向分辨率也最大,垂向和水平 的网格间距分别为 5~29km 和 20~99km。最后通 过三维数据模拟总结出:在组成三联点中的三个扩 张轴中扩张速率最慢的一支和另外两个近共线的扩 张轴在近正交的情况下,不同扩张速率导致地幔流 的速度和温度结构不同。沿着扩张速度比较慢的两 支扩张轴,其上升流的速度和温度沿着扩张轴向靠 近三联点方向都呈上升趋势,然而沿着扩张速度比 较快的扩张轴,其上升流速度和温度结构都没有明 显的变化。这种情况和单独、一支扩张脊的情况比 较相似(图 3a)。和 RTJ 三联点比较相似的三联点, 沿着其扩张速度比较慢的一支扩张轴靠近三联点方 向,其上升流速度的上升幅度可以在 20km 范围内 上升3倍。在部分熔融区深度其温度上升可达 75℃。在和 RTJ 三联点相似的模型中,将每一支扩 张速度都提高 2.4 倍(类似于 GTJ 三联点),发现沿 着扩张轴,其上升流速度和温度都没有明显的变化, 然而,如果把每一支扩张轴的扩张速度降低 2.4 倍, 则发现快速扩张和慢速扩张轴之间的差别明显了 (图 3b)。因此,地球动力对慢速扩张的三联点系统 的影响比对快速扩张三联点系统的影响更大。

Walter 和 Troll(2003 年)在基于 Merle 等 1996 年对 Tenerife 岛火山作用所建立的模型基础上,通 过砂堆物理模拟实验,揭示出三联点每一个轴向的 裂谷作用有可能是由下部地层变形诱导的侧向重力 驱动所产生。实验过程显示如下。首先只对一个砂 堆进行模拟,类似于 Merle 等 1996 年的实验结果。 在实验过程中,中心部位小小地隆起,砂堆的周围形 成脊状的逆冲断层,随着应力的增加砂堆上形成放 射状的地堑。对两个单独的砂堆模拟实验时,两个 砂锥展布范围会逐步部分地叠加,在应力施加到一 定程度时,砂堆的中心位置开始出现沉陷即表示应 力达到极限,横穿两个砂堆的中间出现一个地堑。 结果类似于自然界中两个火山构造相邻的情况,对 Tenerife 的演化也有一个启示意义。在进行 Tenerife 的模拟中,对3个砂堆施加应力达32h后(相当于实 际地质时间 3Ma),对3个砂堆的中心施加第4个应 力,相当于 Canadas 火山(图 3c)。在中心位置同时 还出现了正断裂,该构造代表了伸展构造带的所在 位置,也是裂谷发生的潜在区域。模拟结果说明, Tenerife 岛的火山成因更倾向于火山岩的重力流和 塑性流沿早期的破碎和裂缝侵入。这个结果与 Ancochea 等(2008)解释的 Tenerife 火山岛的时空演 化关系一致,揭示出在三联点中可变形的沉积物对 三联点的构造格架有很强的控制性,使得晚期的火 山喷发作用导致的扩张作用在构造上可以独立地向 外扩张。Tenerife 三联点的构造格架是不稳定的,每 一个轴的分割作用和重力侧向传播作用起着主导作 用。先前火山学认为的由于热点隆起诱导三联点构 造的说法,有些过高估计了深部的内力作用 (Carracedo, 1994, 1996) $_{\circ}$

在 Tenerife 岛上火山沿 NW 和 NE 方向的分布 均表现为线性的定向分布,而在 Canaria 岛南部 NS 向也有大量火山分布,但分布的趋势却不像前面两 个方向的火山那样规律。为了明白 Tenerife 裂谷带 的起源和它们在火山演化过程中的作用,以及验证 NS 向的火山带是不是像前人说的是三叉裂谷系的 第三支,Geyer 和 Marti(2010)在大量前人研究的基 础上,结合实际观察数据制作出二维模型,以两个交

叉的有限元破碎带表示两个主要的裂谷系统。并简 化出流变学模型:将模型覆盖区域远大于研究区域 以忽略边界条件的影响,假设地壳是均衡弹性材料, 只施加了简单的应力。同时忽略掉实际可能存在的 地壳的层理、先前存在的断层、早期的应力等因素。 在实验过程中运用有限元方法(FEMFES),采取杨 氏模量 E = 40 GPa 和泊松比 ν = 0.25 作为标准。结 合在自然中实际观测的在不改变研究结论的前提 下,在一定范围变换以上参数进行对比研究。我们 已经知道火山岩在 Tenerife 南部斜坡的分布情况, 依据最大张应力值场的填充情况可以推算出伸张构 造强烈的区域,也代表了火山喷发的中心位置,最大 主应力的轨迹也指示了火山物质喷发的指向和裂缝 的排布方向(图 3d)。作者的结论同时也支撑了前 人对 Tenerife 的 NW 和 NE 两个轴向裂谷的成因演 化推论(Walter and Troll, 2003; Ancochea et al., 2008)。在 Tenerife 南部的 NS 向展布的火山,不仅 比NW和NE展布的范围要宽,而且也不像NW和 NE 两个轴向排列的指向明确。这种现象有可能是 由于应力场发生过改变或者是新一老火山作用的叠 加导致的结果。所以有关 NS 向的构造是不是三叉 裂谷系的第3支,还要进一步调查(Gever and Marti, 2010)

总之,由于三联点构造的多样性和复杂性,也导 致三联点模拟的难度和多解性。针对不同的三联点 应要考虑不同的模拟实验材料和方法。

1.5 三联点的发育与油气效应

三联点特殊的伸展环境形成的裂谷对油气勘探 和开发有重要的指示意义。在对比 Canyonlands、 Utah 和北海 Viking 形成的三联点裂谷后认为 (Fossenet al., 2009),尽管构造背景不同,但是这些 地堑在油气效应方面都有着明显的相似性。首先表 现在,在地堑系统较深的部位极容易产生烃类有机 物,同时裂谷边缘的转换带断层为油气从小的生油 窗运移到浅部的圈闭扮演着良好的通道角色 (Fossenet al., 2009, Yielding et al., 1997)。而随 着伸展运动进一步的进行,裂谷会进一步的加深,并 不断地伴随着沉降,裂谷深部的更浅部也会形成生 油窗。因此裂谷会提供一个长期的生油时限。其 次,在地堑系统中通常还发生流体沿断层的垂向运 移,甚至横向的封堵断层也会加强或者是连续地起 着引导流体垂向运移的作用。同时,由于集中地热 分布引起的复杂构造,往往进一步加强了垂向的渗 透性(Rowland and Sibson, 2004)。裂谷中的断层不 但起着油气运移的通道作用,由于泥岩在断层面的 "涂抹效果"有时还会形成良好的不渗透夹层,有利 于形成良好的圈闭系统(Alsharhan, 2003)。当然, 断层的封闭能力取决于多个因素,如位移量、岩性和 相应的地层系统等(Yielding et al., 1997)。地堑系 统的共性还表现在裂谷系统中局部构造高点的位



Fig. 3 The experimentation about triple junctions

(a) 一沿着 RTJ 三联点模型扩张轴 R1、R2、R3 的地幔速度;(b) 一预测的在 32 km 深度的温模式(a,b,c 分别为 RTJ、ATJ、GTJ 的 3 个三联 点模型);(c) 一A 左为一个圆锥的端原模型;A 右为两个砂锥的模型,砂锥中间出现一个裂谷;B 为 Tenerife 实验结果;FF、GG 分别为过 t4 模型的两条剖面;(d) 一左为不同超压应力不同组合模型;右为不同模型下应力场 σ 1 应力轨迹(据 Geye 和 Marti,2010 的实验结果) (a) —Model-predicted mantle velocity, along the planes of the R3, R2 and R1 spreading branches;(b) —plan view of predicted temperature patterns for RTJ, ATJ and GTJ triple junction at a depth of 32 km;(c)—A is end member models of a single cone with radial leaf grabens(left photo), and two neighboring cones with a main rift in between(right); B is tenerife experiments, three main extensional zones formed FF, GG are the profile across model t4 respectively; (d)—trajectories of σ 1 for the different numerical examples

置,如断裂伸展的深度、地热隆起的深度等。如果地 堑系统比较大,并且这些构造产生在烃类的运移通 道上,则比较容易产生较大的油气产量,且浅部的产 量往往大于深部的产量,如在 Viking 三联点中的 Viking 断陷中,Kvitebjorn 油田是目前在地堑系统中 具最有利开发前景的油气田,包括 27×10⁶ m³ 的可 开采石油储量和 7.4×10¹⁰ m³ 的可开采天然气储量 (Fossenet al., 2009)。

总结前人有关的研究还发现(Nelson et al., 1992;Yielding et al., 1997;Fossen et al., 2009),如 果有机物埋藏比较深,则只会发现天然气的累积,并 且由于高温高压引起的压实和胶结作用会导致这些 区域的渗透性比较差。而在成熟度比较低的裂谷系 统中,断裂会产生在比较浅的位置,油气的潜力聚集 区也会产生在较浅的位置。

在进行裂谷油气效应分析时还应该综合考虑多 方面的因素,如基底的各向异性、现今应力场和现存 构造的角度、断陷伸展量、断裂深度、裂谷的对称性 和火山物质侵入等的影响(Nelson et al., 1992)。 在对比 Canyonlands、Utah 和北海三联点的 Viking 裂 谷的特征后发现它们都在一定程度上存在有沿裂谷 走向的对称性,在一些由不对称的裂谷系统产生的 半地堑中也有一些和裂谷相同的特征 (Ebinger, 1989)。例如,现今的红海、亚丁湾和东非裂谷是三 联点的典型实例,也是目前发现的唯一一个发育在 海平面以上的 RRR 型三联点:埃塞俄比亚—红海— 亚丁湾三联点是由埃塞俄比亚—红海南端—亚丁湾 三联裂谷和苏伊士湾—亚喀巴湾—红海北端三联裂 谷组成。红海北部又分出苏伊士湾和亚喀巴湾两个 分支裂谷,亚喀巴湾还发育有平移断层,阻碍了苏伊 士湾的断裂伸展。其中埃塞俄比亚和红海北部现在 依然处于大陆裂谷阶段,红海南部和亚丁湾盆地的 轴部已经出现了大洋地壳,亚丁湾盆地轴部甚至出 现了新生洋壳扩张形成的转换断层,说明它们已经 演化到陆间裂谷阶段。在中新世早中期,红海仍然 是以大陆地壳上的地堑(半地堑)、地垒(半地垒)构 造为特征。推测中新世红海仍处于大陆内裂谷阶 段,但大陆岩石圈厚度已经减薄到相当程度。直到 上新世晚期在中央海槽出现由拉斑玄武岩、辉长岩 和辉绿岩组成的新的洋壳,其同位素年龄测定为3.5 Ma,属晚上新世,自此开始海底扩张一直延续到现 在。红海东南端的新生洋壳部分已经与印度 Carlsberg 大洋中脊相连, 热流密度高达 90~180 mW/m²,地温梯度在 28~50 ℃/km 以上(Wever et al.,1999)。从演化特征分析,红海南部的陆间裂谷 是在热点和上地幔柱使地壳隆起破裂形成大陆裂谷 基础上进一步海底扩张形成的,如亚丁湾和红海进 一步扩张,它们将在未来的地质时期演化为类似于 大西洋的新生大洋盆地。勘探表明,石油主要分布 在红海北部和苏伊士湾等大陆裂谷部分,在裂谷深 部仅有一些天然气出现。这是因为裂谷扩张和新生 洋壳的出现使得地温增高导致石油破坏。

2 结论

三联点最早的认识源于板块构造理论,但是到 目前为止其本身还不完善,主要的原因包括以下内 容。

首先,还没有完全清楚板块运动的驱动机制,尽 管现在大多数人认为热对流可能会提供足够的能 量;另外一个原因就是,最初的板块构造想法主要适 用于板块在现在位置的运动情况,并没有联系到缓 慢演化过程中板块边界的变化和它们在地质历史时 期的相对运动(York, 1973)。

以上的问题也同样直接影响到对三联点的研究,包括不同板块构造环境、机制下的板块边界演化 对不同类型三联点形成演化的影响程度,如何定量 分析和再造三联点的形成演化过程,不同类型三联 点所产生的油气效应等的认识都还很肤浅。同时, 这也是今后发展的一些重要方向和研究领域。

相信,随着目前重力、磁力、卫星、地震等方法和

技术的不断进步,对三联点这些方面的研究将越来 越深化和深入,并有更多可喜成果获得。

参考文献 / References

- 李松林,赖晓玲. 2006. 青藏高原东北缘似三联点构造的初步研究. 大地测量与地球动力学, 26 (2): 10~14.
- 田勤俭,丁国瑜. 1998. 青藏高原东北隅似三联点构造特征. 中国地 震, 14 (4): 27~35.
- 杨宗让. 1992. 扬子克拉通北缘加里东期"三叉"裂谷系及其演化历 史初析. 西北地质, 13 (1): 13~18.
- 左仁广, 汪新庆. 2004. 计算机辅助地质调查三联点地质模型的研 究. 工程地质计算机应用, 1:1~10.
- Alsharhan A S. 2003. Petroleum geology and potential hydrocarbon plays in the Gulf of Suez rift basin, Egypt. AAPG Bulletin, 87 (1): 143 ~180.
- Ancochea E, Brändle J L, Huertas M J. 2008. Dike-swarms, key to the reconstruction of major volcanic edifices: the basic dikes of La Gomera (Canary Islands). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 173: 207 ~ 216.
- Apotria T G, Gray N H. 1985. Absolute motion and evolution of the Bouvet triple junction. Nature, 316 (15): 623~625.
- Bhattacharji S, Koide H. 1975. Mechanistic model for triple junction fracture geometry. Nature, 255: 21 ~ 24.
- Babuska V, Plomerova J. 2008. Control of paths of Quaternary volcanic products in Western Bohemian Massif by rejuvenated variscan triple junction of ancient microplates. Study Geophys. Geod., 52: 607 ~ 629.
- Bird R T, Tebbens S F, Kleinrock M C, Naar D F. 1999. Episodic triple-junction migration by rift propagation and microplates. Geology, 27 (10): 911 ~914.
- Briais A. 1995. Structural analysis of the segmentation of the central Indian Ridge between 20° 30' S and 25° 30' S (Rodriguez triple junction). Marine Geophysical Researches, 17: 431 ~467.
- Brunelli D, Cipriani A, Ottolini L, Peyve A, Bonatti E. 2003. Mantle peridotites from the Bouvet triple junction region, South Atlantic. Terra Nova, 15 (3): 194 ~ 203.
- Burke K, Dewey J F. 1973. Plume-generated triple junction: key indicators in applying plate tectonics to old rocks. Journal of Geology, 81: 406 ~ 433.
- Carracedo J C. 1996. Morphological and structural evolution of the western Canary Islands: hotspot-induced three-armed rifts or regional tectonic trends? Journal of Volcanology and Geopthermal Research, 72: 151 ~ 162.
- Carracedo J C. 1994. The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, $60: 225 \sim 241$.
- Ebinger C J. 1989. Geometric and kinematic development of border faults and accommodation zones, Kivu—Rusizi rift. Tectonics, 8: 117~133.
- Fossen H, Schutlz R A, Rundhovde E, Rotevatn A, Buckley S J. 2009. Fault linkage and graben stepovers in the Canyonlands (Utah) and the North Sea Viking Graben, with implications for hydrocarbon migration and accumulation. AAPG Bulletin, 94 (5): 597 ~613.
- Georgen J E, Lin J. 2002. Three-dimensional passive flow and temperature structure beneath oceanic ridge—ridge—ridge triple junctions. Earth and Planetary Science Letter, 204 (2002): 115 ~

132.

- Geyer A, Marti J. 2010. The distribution of basaltic volcanism on Tenerife, Canary Island: implications on the origin and dynamics of the rift systems. Tectonophysics, 483: 310 ~ 326.
- Gulick S P S, Meltzer A S, Henstock T J, Levander A. 2001. Internal deformation of the southern Gorda plate: fragmentation of a weak plate near the Mendocino triple junction. Geological Society of America, 29 (8): 691~694.
- Hyndman R D, Hamilton T S. 1993. Queen Charlotte Area Cenozoic tectonics and volcanism and their association with relative plate motions along the northeastern Pacific margin. Journal of Geophysical Research, 98 (B8): 14257 ~ 14277.
- Jarvis P A, Kroenke L. 1993. Structural development of central North Fiji Basin triple junction. Geo-Marine Letter, 13: 133 ~ 138.
- Larson R L, Pockalny R A, Viso R F, Erba E, Abrams L J, Luyendyk B P, Stock J M, Clayton R W. 2002. Mid-Cretaceous tectonic evolution of the Tongareva triple junction in the southwestern Pacific Basin. Geological Society of America, 30 (1): 67 ~70.
- Ligi M, Bonatti E, Bortoluzzi G, Carrara G, Fabretti P, Gilod D, Peyve A A, Skolotnev S, Turko N. 1999. Bouvet triple junction in the South Atlantic: geology and evolution. Journal of Geophysical Research, 104 (B12): 29365 ~ 29385.
- Lock J, Kelsey H, Furlong K, Woolace A. 2006. Late Neogene and Quaternary landscape evolution of the northern California coast ranges: evidence for Mendocino triple junction tectonics. GSA Bulletin, 118 (9): 1232 ~ 1246.
- Lourenco N, Miranda J M, Luis J F, Ribeiro A, Mendes V L A, Madeira J, Needham H D. 1998. Morpho-tectonic analysis of the Azores Volcanic Plateau from a new bathymetric compilation of the area. Marine Geophysical Researches, 20: 141 ~156.
- McKenzie D P, Morgan W J. 1969. Evolution of triple junctions. Nature, 224: 125 ~ 133.
- Merle O, Borgia A, 1996. Scaled experiments of volcanic spreading. Journal Geophysical Research, 101: 13805 ~ 13817.
- Migdisova N, Sobolev A, Sushchevskaya N, Belyatsky B, Kuzmin D. 2010. Mantle evolution under the Bouvet triple junction (SMAR) from the aspect of tectonic and geochemistry. Geophysical Research Abstracts, 12: 10307
- Mitchell N C, Livermore R A. 1998. The present configuration of the Bouvet triple junction. Geology, 26 (3): 267 ~ 270.
- Munschy M, Schlich R. 1989. The Rodriguez triple junction (Indian ocean): structure and evolution for the past one million years. Marine Geophysical Research, 11:1~14
- Nelson R A, Patton T L, Morley C K. 1992. Rift—segment interaction and its relationship to exploration in continental rift systems. AAPG Bulletin, 76: 1153 ~ 1169.
- Patriat Ph, Parson L. 1989. A survey of the Indian Ocean triple junction trace within the Antarctic Plate: implications for the junction evolution since 15 Ma. Marine Geophysical Researchs, 11: 89 ~ 100.
- Petters S W. 1978. Stratigraphic evolution of the benue trough and its implications for the upper cretaceous paleogeography of west Africa. The Journal of Geology, 86 (3): 311 ~ 322.
- Pichon Y L, Huchon P. 1987. Central Japan triple junction revisited. Tectonics, 6 (1): 35 ~ 45.
- Rowland J V, Sibson R H. 2004. Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo volcanic zone, New Zealand. Geofluids, 4: 259 ~ 283,

- Schouten H, Smith D K, Laurent G J, Zhu W, Klein E M. 2008. Cracking of lithosphere north of the Galapagos triple junction. Geology, 36 (5): 339 ~ 342.
- Searle R C, Francheteau J. 1986. Morphology and tectonics of the Galapagos triple junction. Marine Geophysical Researches, 8 (1986): 95~129.
- Seno T, Takano T. 1989. Seismotectonics at the Trench—Trench— Trench Triple Junction off Central Honshu. Pagephy, 129 (1~2): 27~40.
- Tamaki K, Larson R L. 1988. The Mesozoic tectonic history of the Magellan microplate in the western Central Pacific . Geophysical Reseach, 93: 2857 ~ 2874.
- Tesfaye S , Harding D J, Kusky T M. 2003, Early continental breakup boundary and migration of the Afar triple junction. Ethiopia GSA Bulletin, 115 (9): 1053 ~ 1067.
- Theodore G A, Norman H G. 1985. Absolute motion and evolution of the Bouvet triple junction. Journal of tetters tonature, 316 (15) : 623 ~625.

- Walter T R. 2003. Buttressing and fractional spreading of Tenerife, an experimental approach on the formation of rift zones. Geophysical Reserch Letters, 30 (6): 29 ~ 32.
- Walter T R, Troll V R. 2003. Experiments on rift zone evolution in unstable volcanic edifices. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 127: 107 ~ 120.
- West B P, Fujimoto H, Honsho C, Tamaki K, Sempere J C. 1995. A three-dimensional gravity study of the Rodrigues triple junction and Southeast Indian Ridge. Earth and Planetary Science Letter, 133: 175 ~ 184.
- Wever H E, Alsharhan A S, Salah M G. 1999. A common source rock for Egyptian and Saudi hydrocarbons in the Red Sea. AAPG Bulletin, 83 (5): 802 ~ 806.
- Wilson J T. 1966. Did the Atlantic close and then re-open? Nature, 211: 676 ~ 681.
- York D. 1973. Evolution of triple junction . Nature, 244: 341 ~ 342.
- Yielding G, Freeman B, Needham D T. 1997. Quantitative fault seal prediction. AAPG Bulletin, 81: 897 ~917.

Advances in Study of Triple Junctions

SUN Zhuan¹⁾, YANG Fengli²⁾, ZHANG Na²⁾, WANG Zixuan¹⁾, WANG Wenyan³⁾

1) Liaohe Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Panjin, Liaoning, 124010;

2) School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai, 200092;

3) Shanghai Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Shanghai, 200030

Abstract: Triple Junction is the point where the boundaries of three tectonic plates meet. At the triple junction, a boundary will be one of the 3 types (a ridge, trench or transform fault). The earliest understanding of triple junction is based on the tectonic plate. Since it is especially important tectonically, we can get better and deeper understanding about tectonic plate through the study of triple junction. Different shape or type of triple junction can indicate different tectonic environment and movement history. Meanwhile, it has significant impact of oil and gas resources. This thesis discusses the evolution of the concept of the triple junction, the type, identification, evolution, and simulation of a quantitative description of progress. And oil and gas resources effect has also been analyzed. Finally, the research of the triple junction is predicted.

Key words: triple junction; identification; evaluation; simulation; prospect