文章编号: 0253-2697(2017)03-0255-12 DOI:10.7623/syxb201703002

塔里木新元古代裂谷盆地南北分异及油气勘探启示

任 荣 管树巍 吴 林 朱光有

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:综合航磁、地震、地质和地球化学资料,研究了塔里木新元古代裂谷盆地南北分异的表层构造、沉积、分布特征及深层动力学 机制,揭示了裂谷盆地演化及其对寒武纪早期沉积盆地和深层烃源岩分布的控制作用。塔里木南部裂谷盆地是罗迪尼亚超大陆裂 解早期超级地幔柱活动的产物,开启于南华纪早期(约780 Ma),表现为深入塔里木盆地内部的 NE 向坳拉槽,而北部裂谷是泛罗迪 尼亚大洋板块俯冲产生的弧后裂谷盆地,开启于南华纪后期(约740 Ma),呈近 EW 向狭长带状横穿整个塔里木盆地。塔里木北部 新元古代弧后裂谷盆地与东亚地区晚中生代—新生代弧后裂谷盆地群的形成和演化过程十分相似,均显示向洋迁移的演化特征, 但塔里木裂谷盆地从早期的断陷-拗陷最终演化成被动陆缘。塔里木新元古代裂谷盆地不仅决定同裂谷期烃源岩的分布,更控制 早寒武世沉积盆地的发育,使得后者"向前相似",在现今塔北隆起与中央隆起带之间很可能发育近 EW 向展布的南华系—震旦系 同裂谷期和下寒武统玉尔吐斯组沉积期后裂谷期烃源岩。

关键词:新元古代;裂谷;南北分异;下寒武统;塔里木盆地;烃源岩

中图分类号:TE121.1 文献标识码: A

The north-south differentiation characteristic and its enlightenment on oil-gas exploration of the Neoproterozoic rift basin, Tarim Basin

Ren Rong Guan Shuwei Wu Lin Zhu Guangyou

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Comprehensively based on the aeromagnetic, seismic, geological and geochemical data, this paper studies the surficial structures, deposition, distribution characteristics and the deep-seated dynamical mechanism for the north-south differentiation of Neoproterozoic rift basin of Tarim Basin, and reveals the evolutionary characteristics of the rift basin and its controlling effect on the distribution of the early Cambrian sedimentary basin and the deep hydrocarbon source rocks. The southern rift basin of Tarim is the product of superplume activity occurred in the early break-up period of Rodinia Supercontinent, starting from the early Nanhua period (about 780 Ma)and shown as the NE-trending aulacogens that extended deeply inside of Tarim basin. The northern rift belongs to the back-arc rift basin derived from the subduction of Pan-Rodinia oceanic slab, starting from the late Nanhua period (about 740 Ma)and shown as the nearly EW-trending narrow band zone traversing the whole Tarim basin. The formation and evolution process of the Neoproterozoic back-arc rift basin, northern Tarim is quite similar to that of the late Mesozoic-Cenozoic back-arc rift basins in East Asia, both showing the evolutionary characteristics of oceanward migration. Nevertheless, the Tarim rift basin was finally evolved from the early fault depression-sag into the passive continental margin. The Neoproterozoic rift basin of Tarim controlled not only the distribution of syn-rifting hydrocarbon source rocks, but also the development of early Cambrian sedimentary basin, which made the latter similar to the rift basin. Thus, hydrocarbon source rocks in the nearly EW-trending Nanhua-Sinian syn-rift period and the postrifting period of Lower Cambrian Yuertusi Formation are likely developed between the north Tarim uplift and the central uplift belt. **Key words**; Neoproterozoic; rift, north-south differentiation; Lower Cambrian; Tarim Basin; hydrocarbon source rocks

引用:任荣,管树巍,吴林,朱光有. 塔里木新元古代裂谷盆地南北分异及其油气勘探启示[J]. 石油学报,2017,38(3):255-266.

Cite: REN Rong, GUAN Shuwei, WU Lin, ZHU Guangyou. The north-south differentiation characteristic and its enlightenment on oil-gas exploration of the Neoproterozoic rift basin, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 255-266.

塔里木盆地是中国内陆最大的含油气克拉通盆 地,现今为弧形山系所环绕,北缘为古亚洲构造体系的 南天山山脉,南缘为特提斯构造体系的西昆仑—阿尔 金山脉,构成了典型的盆-山耦合体系。在新元古代早

基金项目:中国石油天然气股份有限公司"油气勘探新领域、新理论、新方法、新技术研究"项目(2014A-02)和中国博士后科学基金项目 (2015M581129)资助。

第一作者:任 荣,男,1985年10月生,2008年获吉林大学地质学专业学士学位,2013年获北京大学构造地质学专业博士学位,现为中国石油勘探开发研究院博士后,主要从事区域构造与石油地质研究。Email:rr@petrochina.com.cn

通信作者:管树巍,男,1970年6月生,1993年获长春地质学院学士学位,2004年获浙江大学博士学位,现为中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心高级工程师,主要从事含油气盆地构造分析工作。Email:guan@petrochina.com.cn

期,塔里木由南、北塔里木陆块及之间的中塔里木弧地 体碰撞拼贴形成统一基底^[1-2]。作为对罗迪尼亚(Rodinia)超大陆裂解的响应,在南华纪一震旦纪发育广 泛的裂谷伸展构造和岩浆作用,控制形成盆地的第一 套沉积盖层^[2-5]。航磁和地震资料揭示,南华纪一震旦 纪塔里木盆地具有南北分异的裂谷分布形态,其可能 属于不同的成因类型,由不同的动力学机制形成。特 别是,最新地质证据显示塔里木盆地北部新元古代裂 谷很可能与 Rodinia 超大陆边缘的俯冲作用密切相 关^[6-7],这与先前长期存在的地幔柱裂谷-拗拉槽观 点^[2,45,8-9]存在明显差异。

目前关于塔里木盆地寒武纪早期沉积盆地的分布也 存在较大争议,主要为东盆西台即东部深水盆地、西部碳 酸盐台地^[10-11]或者南北分异^[12]格局。前者具有"向后相 似"特征,与中寒武世一奥陶纪构造-沉积格局基本一致; 后者则与新元古代裂谷"向前相似",显示南北不同的构 造-沉积格局。这2种格局决定寒武纪早期玉尔吐斯组沉 积期包括盆地西部的玉尔吐斯组和东部的西山布拉克组 烃源岩具有截然不同的分布形态,并产生不同的勘探方 向。而对新元古代裂谷盆地形成和演化动力学机制的研 究将为此问题的解决提供深部背景制约。

综合了航磁、地震、地质和地球化学等研究成果, 运用比较大地构造研究思维,力求阐明塔里木新元古 代裂谷盆地南北分异的表层构造、沉积等特征,并在此 基础上揭示其深层动力学机制及其对寒武纪早期沉积 盆地和深层烃源岩分布的控制作用,以期推动塔里木 盆地深层石油地质条件和油气勘探研究的深入发展。

1 裂谷南北分异特征

塔里木盆地广泛发育新元古代裂谷,是罗迪尼亚 超大陆新元古代裂解事件的重要响应和标志性伸展构 造^[2,13-15]。但是,塔里木盆地具有南北分异的裂谷特 征,在裂谷充填序列、盆地开启时限、分布形态等方面 表现出明显差异。

1.1 裂谷充填序列

塔里木盆地的南华系一震旦系主要出露于东北缘 库鲁克塔格、西北缘阿克苏和西南缘西昆仑铁列克提 地区(图1)。露头地层厚度数千米,最厚处位于库鲁 克塔格,可达6000m,而在盆地内部由于钻遇和钻穿 南华系一震旦系的钻井很少,其充填序列主要依据盆 缘露头和地震资料进行追踪推断。

在库鲁克塔格地区,南华系一震旦系角度不整合 覆盖于青白口纪帕尔岗塔格群和约 780 Ma 的花岗岩 之上^[16-18],以多套火山岩和冰碛岩的相间发育为特征 [图 1(a)]。南华系底部贝义西组具有由粗到细快速 变化的充填序列,并广泛发育双峰式火山岩(740~725 Ma)^[19],是裂谷断陷高峰期的产物。贝义西组、阿勒 通沟组和特瑞艾肯组火山岩的存在表明南华纪火山作 用强烈,很可能发育多期断陷活动。震旦纪期间,火山 活动较弱,仅在扎摩克提组和水泉组出现部分火山岩。 总体上,库鲁克塔格南华纪以断陷为主,到震旦纪则变 为拗陷。此外,与火山活动相间发育的贝义西、阿勒通 沟、特瑞艾肯、汉格尔乔克4个冰期事件,可以跟新元 古代"雪球事件"的4个全球性冰期很好对应^[19-20],指 示火山活动很可能是间冰期产生的主要控制因素。

在阿克苏地区,南华系底部西方山组粒度变化较 大,沉积韵律发育,反映快速堆积特征,向上变为巧恩 布拉克组和尤尔美那克组杂砾岩、杂砂岩和冰碛岩沉 积[图1(b)]。但是,未见南华系底部及其与阿克苏群 的接触,仅见尤尔美那克组角度不整合覆盖于阿克苏 群之上,并含有阿克苏群蓝片岩砾石。震旦系与南华 系呈平行不整合接触,并角度不整合覆盖于阿克苏群 之上,从下到上依次发育苏盖特布拉克组河流相-湖相 碎屑岩和奇格布拉克组海相白云岩。尽管 Turner 认 为震旦系可能代表一期新的裂谷事件^[8],但鉴于其发 育较薄的火山岩、地层厚度较小(<1000m)且横向变 化不大,很可能为裂谷拗陷期超覆沉积。与库鲁克塔 格相比,阿克苏地区南华纪和震旦纪火山岩不发育。

在铁列克提地区,南华系角度不整合覆盖在苏库洛 克群之上,同样显示由粗到细快速堆积特征,在底部牙拉 古孜组发育大套红色砾岩,向上过渡为砂岩、粉砂岩和泥 岩沉积,并在波龙组和雨塘组发育冰碛岩[图1(c)],后者 可与特瑞艾肯组和尤尔美那克组冰碛岩对比(图1)。 震旦系整合覆盖于南华系之上,主要由砂岩和粉砂岩 组成,仅在后期存在海侵,发育少量白云岩,整体上反 映构造变化较弱的拗陷沉积环境。该区南华系一震旦 系中未见火山岩。

综上所述,塔里木盆地南华系一震旦系显示典型 的裂谷断陷-拗陷充填特征,其中断陷活动主要发生在 南华纪,而震旦纪以拗陷为主,并且不同地区的裂谷充 填序列和火山活动存在明显差异。

1.2 裂谷盆地开启时限

裂谷岩浆和地层可以很好限定裂谷盆地的开启时限。前者以裂谷活动初期的大火成岩省、基性岩墙群和 双峰式岩浆岩为主,其中大火成岩省和基性岩墙群一般 早于裂谷盆地的开启时限^[21],双峰式岩浆岩则标志着裂 谷盆地已经开启;后者多为典型的裂谷盆地沉积序列,又 称为裂谷成因相组合,具有由粗快速变细特点^[22],代表裂 谷盆地的确切发育时限。裂谷岩浆和地层资料显示塔里 木盆地南、北部具有截然不同的裂谷盆地发育时限。



Fig. 1 Stratigraphic column of the Nanhua-Sinian in marginal outcrops of the Tarim Basin

塔里木盆地西南缘基性岩墙群和双峰式岩浆岩年 龄分别为 802 和 783 Ma^[23-24],指示南部裂谷盆地很可 能开启于南华纪早期(约 780 Ma)。这与塔西南南华 系裂谷序列角度不整合覆盖于上述基性岩墙之上以及 波龙组约 750 Ma 的最大沉积年龄^[25]一致[图 1(c)]。 而塔里木北部 773~759 Ma 基性岩墙群侵入到包括阿 克苏群蓝片岩在内的变质基底和早期花岗岩(820~ 780 Ma)之中^[26],其均被南华系一震旦系角度不整合 覆盖,指示北部裂谷在 759 Ma 之前尚未开启。同时, 代表裂谷早期沉积的贝义西组发育 740~725 Ma 的双 峰式火山岩^[19],西方山组也具有小于 748 Ma 的沉积 年龄^[27]。这些证据均显示塔里木北部裂谷很可能开 启于约 740 Ma。因此,塔里木盆地南部比北部裂谷盆 地开启时间早约 40 Ma。 然而需要注意的是,虽然塔里木西北缘和东北缘 裂谷盆地很可能同时开启于约740 Ma,但是前者明显 缺失后者存在的大多期裂谷岩浆活动并且发育较为简 单的南华系一震旦系[图1(a)和图1(b)],其是否形 成于同一裂谷的不同位置或者不同的裂谷阶段尚不 明确。

1.3 裂谷分布形态

根据断陷地层的快速沉积和厚度向边缘快速变 薄、在边缘快速尖灭等特点,地震剖面上的前寒武纪楔 状反射往往被作为识别塔里木盆地内部南华纪裂谷断 陷地层的主要标志,以满加尔拗陷周缘的楔状反射为 代表[图 2(a)、图 2(c)和图 2(d)]。而以塔北隆起为代 表的前寒武纪连续、弱振幅席状反射[图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c)],在南华纪楔形反射之上显示大范围的超 覆特征,经星火1井证实为震旦系,反映沉积和构造环 境较为平静,标志着裂谷拗陷沉积。同时,地震剖面上 的前寒武纪杂乱反射为前南华纪的结晶基底,已被中深 1井、沙53井、星火1井等年代学资料^[2]证实(图2)。 因此,鉴于盆地内部钻遇南华系和震旦系的钻井很少, 而寒武系底界的地震反射特征稳定、易于进行全盆地 追踪,利用这3类前寒武纪反射可大致确定南华系、震 旦系的厚度和边界,并得出裂谷的分布形态。





塔里木盆地北部南华系呈狭长带状分布,近 EW 向横穿整个盆地,受控于一系列沿走向分布的半地堑 或者地堑(图 2),宽度和厚度均由盆地内部向东北缘 和西北缘逐渐增加,宽度 60~200 km,最大厚度超过 2000 m[图 3(a)]。盆地南部南华系存在 2 个分支,均 呈 NE 向展布,宽度 60~200 km,厚度由盆内向盆缘 逐渐加大,最大厚度超过 1 600 m[图 3(a)]。上述南北 分异的裂谷分布形态与航磁异常反映的塔里木盆地北 部 EW 向和南部 NE 向基底构造格局基本吻合。

塔里木在震旦纪继承南华纪的沉积格局,也具 有南北分异的裂谷分布形态,但分布范围更广,地 层厚度明显变小(<800 m),反映裂谷拗陷期的沉 积特点[图 3(b)]。同时,与南华系相比,塔里木北 部震旦系沉积中心部分向北发生迁移(图 3)。这种 迁移特征在地震剖面 AA'和 CC'[图 3(a)和图 3(c)] 中可以看出。



图 3 塔里木盆地南华系和震旦系厚度分布

Fig. 3 Isopach distribution of the Nanhua and Sinian in the Tarim Basin

2 裂谷南北分异形成的动力学机制

作为塔里木盆地在基底形成之后的第一套沉积盖 层,南华系一震旦系及其伴随的大规模岩浆活动,长期 以来一直被认为具有裂谷成因背景,是对新元古代罗 迪尼亚超大陆裂解过程的响应^[2,13-15]。但是,裂谷充 填序列、盆地开启时限及分布形态等显示塔里木盆地 具有南北分异的裂谷特征,其很可能由不同的动力学 机制形成。

2.1 南部裂谷形成动力学机制

古地磁与地质证据显示,塔里木在新元古代位 于罗迪尼亚超大陆北缘,北部朝向泛罗迪尼亚大洋, 南部则与澳大利亚克拉通西北部相连接(图 4)^[15,28]。 与澳大利亚克拉通直接相连表明塔里木南部处于罗 迪尼亚超大陆内侧,在超大陆裂解时,该区域俯冲作 用已经完全消失,并且不易受到超大陆周缘俯冲作 用的影响。同时,塔里木南缘西昆仑地区南华纪裂 谷相关基性岩墙和双峰式岩浆岩具有板内/陆内 OIB (洋岛玄武岩)型的微量元素地球化学特征^[23-24],明 显缺少 Nb、Ta 亏损等指示的俯冲作用影响。因此, 塔里木南部南华纪裂谷的形成与超大陆/板块边缘 作用无关,而很可能与超大陆/板块内部地幔柱作 用有关,为塔里木西南缘与澳大利亚克拉通裂离的 产物。



(720 Ma,据文献[15]修改)

Fig. 4 Location of the Tarim Craton in the Rodinia supercontinent at 720 Ma

2.2 北部裂谷形成动力学机制

目前塔里木北部裂谷主要存在地幔柱裂谷和弧后 裂谷的争议。在地幔柱裂谷模式中,塔里木北部南华 纪一震旦纪以发育早期地幔柱裂谷和晚期被动大陆边 缘为特征,与罗迪尼亚超大陆汇聚相关的俯冲增生作 用很可能在760 Ma时已经停止^[2,9],因此,开启于南华 纪中后期(740 Ma)的北部裂谷由地幔柱活动产生,与 俯冲无关。而在弧后裂谷模式中,南华纪一震旦纪塔 里木北缘的俯冲增生作用一直存在,同期地层和岩浆 岩形成于俯冲产生的岛弧和弧后裂谷盆地环境^[7,29]。

尽管地幔柱活动可能同时存在并发挥部分作用,但 通过对笔者新获取数据(图 5 和表 1)和前人资料的综合 分析,笔者认为塔里木北部裂谷的形成与演化主要与超 大陆外侧泛罗迪尼亚大洋洋壳俯冲导致的弧后伸展有 关,证据为:①塔里木北部处于罗迪尼亚超大陆外缘,直 接面向泛罗迪尼亚大洋,不可避免受到超大陆边缘长期 存在的环罗迪尼亚俯冲作用影响(图 4);②塔里木北缘 阿克苏和库鲁克塔格地区南华纪裂谷相关基性岩墙群 和双峰式火山岩显示明显的俯冲特征,如 Nb、Ta 亏损 「图 5(a)^[26,30];③与塔里木南部相比,北部在裂解初期明 显缺少地幔柱活动直接产物,如OIB型玄武岩或高镁玄 武岩等;④南华系贝义西组砂岩具有活动大陆边缘碎屑 岩的地球化学特征,指示其很可能形成于大陆边缘弧相 关的裂解环境^[29]。此外,蛇绿岩的年代学和成因研究表 明,塔里木北缘的南天山洋盆在震旦纪中晚期(600 Ma)已 经开启,并具有复合弧后盆地演化特征^[7],进一步印证了塔 里木北部在南华纪一震旦纪期间的弧后裂谷盆地模式。

然而,塔里木北部裂谷中后期火山岩(655~542 Ma)包括阿克苏地区苏盖特布拉克组和库鲁克塔格地 区阿勒通沟组、扎莫克提组、水泉组与西山布拉克组玄 武岩均显示 OIB 型的地球化学特征[图 5(b)和图 5(c), 无明显 Nb、Ta 负异常]^[5,31-32],与早期裂谷相关基性 岩墙和双峰式火山岩的地球化学特征[图 5(a),Nb、 Ta 负异常]明显不同,指示裂谷中后期俯冲带很可能 已经随着南天山洋张开而向北迁移,从而导致地幔柱 活动取代俯冲作用占据主导地位。该期地幔柱活动可 能为诱发罗迪尼亚超大陆裂解的超级地幔柱的末期阶 段或者由俯冲带弧后伸展作用引起地幔上涌产生。总 之,塔里木北部在裂谷演化早期阶段由俯冲产生的弧 后伸展作用控制,而中后期随着俯冲带的向洋迁移和 南天山洋的打开,开始受到地幔柱作用影响。



图 5 塔里木盆地北部裂谷相关岩浆岩微量元素标准化图解 Fig. 5 Normalized trace element patterns of the rift magmatic rocks in northern Tarim Basin

正是上述不同的裂谷形成动力学机制,导致塔里 木发育南北分异的裂谷盆地开启时限和分布形态。塔 里木南部裂谷与南华纪早期全球超级地幔柱活动密切 相关,开启较早,呈 NE 向展布,表现为深入克拉通内 部的拗拉槽;而北部裂谷主要受控于超大陆边缘大洋 洋壳俯冲产生的弧后伸展作用,开启较晚,裂谷沉积呈 狭长带状分布,走向近 EW。

3 裂谷盆地演化

塔里木新元古代裂谷盆地演化与罗迪尼亚超大陆 的裂解及塔里木周缘各洋盆包括南天山洋、西昆仑— 阿尔金—祁连洋的开启扩张有关,从早期的裂谷断陷 经裂谷拗陷最终演化成被动陆缘。

南华纪,随着罗迪尼亚超大陆开始裂解,塔里木盆 地内部和边缘发育强烈的裂谷岩浆与构造作用。受全 球超级地幔柱活动影响,塔里木南部裂谷盆地在南华 纪早期打开(约780 Ma),显示地幔柱裂谷的分布和演 化特征[图6(a)和图7(a)、图7(b)]。而此时,塔里木北 部主要受控于北缘的泛罗迪尼亚大洋(古亚洲洋前身) 俯冲体系,发育大陆边缘弧岩浆活动和俯冲增生造山作 用,形成阿克苏群蓝片岩(<820 Ma、>760 Ma)^[26,33],并 在约780 Ma发生哈萨克斯坦、伊犁、中天山等地块向塔 里木的碰撞拼贴[图7(a)和图7(b)],使表层沉积岩快 速埋藏并遭受高压麻粒岩相变质作用^[34]。

表 1 塔里木盆地北部裂谷相关岩浆岩的主微量元素数据 Table 1 Maior and trace element data of the rift-related magmatic rocks in the northern Tarim Basin

样品		阿克苏基性岩墙				西山布拉克组玄武岩		扎摩克提组玄武岩	
成分/元素	1	2	3	4	1	2	1	2	
SiO ₂	50.55	50.42	49.13	49.03	47.27	47.01	43.37	43.44	
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	14.24	14.27	13.81	13.88	16.75	16.72	13.94	13.90	
Fe_2O_3	12.63	12.71	13.16	12.88	11.32	10.97	7.36	6.66	
MgO	3.69	3. 71	4.08	4.06	4.62	4.45	2.32	2.01	
CaO	6.52	6.53	7.40	7.36	6.17	6.6	12.05	12.38	
Na_2O	3.65	3.69	3.31	3.30	3.05	2.95	4.68	4.76	
K_2O	2.21	2.25	1.83	1.85	2.53	2.67	0.84	1.01	
${\rm TiO}_2$	2.69	2.71	3.11	3.07	2.73	2.78	3.49	3.66	
P_2O_5	1.25	1.25	1.44	1.43	0.64	0.67	0.25	0.27	
MnO	0. 23	0. 23	0.21	0.24	0.17	0.17	0.19	0.19	
LOI	1.80	1.70	2.00	2.40	4.40	4.70	11.20	11.50	
Total	99.47	99.48	99.49	99.51	99.66	99.70	99.70	99.79	
Rb	31.60	30.30	34.50	29.90	34.60	35.20	21.00	25.60	
Ba	2684.00	2 585.00	2 3 27.00	2 291. 00	677.00	670.00	730.00	809.00	
Th	3.00	3.00	2.80	2.50	4.50	4.80	1.30	1.20	
U	0.70	0.80	0.80	0.60	1.00	1.10	0.80	0.90	
Nb	9.20	8.00	6.90	7.20	39.90	37.40	28.20	27.90	
Та	0.40	0.30	0.40	0.50	2.30	2.30	1.80	1.50	
Pb	5.50	5.40	5.70	5.00	4.20	4.70	1.10	1.20	
Sr	502.30	470.00	473.20	397.60	316.00	302.40	467.60	391.70	
Zr	215.30	213.80	190.60	182.60	271.90	262.10	177.80	177.60	
Hf	5.30	4.90	5.10	4.70	6.40	5.90	4.50	5.20	
Υ	43.60	42.00	41.10	41.20	31.00	32.00	12.20	15.10	
La	36.30	36. 20	35.20	35.50	41.40	43.30	15.50	16.70	
Ce	79.40	80.30	74.20	83.80	93.00	85.40	35.00	38.10	
Pr	10.83	11.03	10.48	11.10	10.86	10.50	5.03	5.45	
Nd	50.30	47.50	48.70	49.10	41.90	43.50	24.20	23.90	
Sm	10.01	10.54	9.94	9. 71	8.63	8.68	5.30	5.81	
Eu	4.85	5.11	4.85	4.80	3.08	3.26	2.09	2.54	
Gd	9. 91	9.57	10.06	9.81	7.77	7.74	4.37	5.58	
Tb	1.32	1.34	1.36	1.33	1.08	1.10	0.58	0.76	
Dy	8.56	7.79	8.28	8.00	6.39	6.49	3.20	3.72	
Ho	1.60	1.47	1.59	1.50	1.12	1.15	0.47	0.64	
Er	4.31	4.18	4.46	4.05	3. 23	3.12	1.30	1.50	
Tm	0.58	0.60	0.55	0.56	0. 43	0.42	0.17	0.19	
Yb	3.78	4.01	3.63	3.54	2.81	2.72	1.16	1.23	
Lu	0.57	0.56	0.49	0.56	0.37	0.35	0.13	0.17	

注:1-4数字表示样品编号。



Fig. 7 Neoproterozoic tectonic evolution of the Tarim Basin and adjacent regions

从 780 Ma 开始,塔里木北缘泛罗迪尼亚大洋板块的俯冲引起盆地北部地区发生弧后伸展作用,但此时伸展较弱、裂谷盆地尚未打开,不发育裂谷沉积,主要表现为裂谷初期 773~759 Ma 基性岩墙群^[26]的侵入 [图 6(a)、图 7(b)]。盆地内部近于同期发育的岩浆事件,如同 1 井 755 Ma 安山岩^[2]和塔参 1 井 757 Ma 花岗岩^[35],则指示塔里木盆地在部分地区很可能仍然受到地幔柱活动影响。

晚南华世(<740 Ma),塔里木北部弧后伸展达到 高峰,以贝义西组为代表的双峰式岩浆活动(740~725 Ma)^[19]标志着弧后裂谷盆地开启,与俯冲方向平行, 呈近 EW 向狭长带状展布[图 6(b)、图 7(c)]。与南部 地幔柱裂谷盆地相比,北部弧后裂谷盆地打开晚约 40 Ma。而从整体上来看,塔里木在罗迪尼亚超大陆中处 于边缘位置,远离地幔柱中心,裂谷活动时间明显晚于 处于超大陆中心位置的华南克拉通(图 4)。在华南地 区,科马提岩、大火成岩省等裂谷初期阶段标志性岩浆 岩显示其裂谷岩浆活动开始于约 820 Ma^[36-37],裂谷沉 积指示其裂谷盆地几乎同时开启^[22]。

震旦纪期间,由于俯冲板片后退和俯冲带向洋的 持续迁移,塔里木北部的弧和弧后裂解中心同样向洋 发生转移,南天山洋开始张开,导致哈萨克斯坦、伊犁、 中天山等块体从塔里木裂离[图 6(b)、图 7(d)]。同时, 塔里木北部地区的弧后伸展作用逐渐变弱,超级地幔柱 或由弧后伸展诱发的地幔柱活动开始占据主导地位,但 其活动性较弱,没有产生显著的裂谷构造与岩浆作用, 塔里木北部裂谷从此进入拗陷阶段并进一步演化成被 动陆缘^[38-39]。而南部裂谷随着地幔柱活动的减弱,深入 塔里木内部分支成为拗拉槽,其他则裂解形成始特提 斯洋,使澳大利亚与塔里木分离,并发育被动陆缘。这 与蛇绿岩年龄资料显示的塔里木盆地北缘南天山洋、 南缘始特提斯洋即西昆仑一阿尔金一祁连洋在震旦纪 已经打开^[40-41]、寒武纪持续发育^[42-43]的事实一致。

塔里木北部新元古代弧后裂谷盆地和南天山洋盆 的形成、演化过程与太平洋西侧东亚地区晚中生代--新生代弧后裂谷盆地群的形成过程十分相似,均显示 向洋迁移的弧后盆地演化特征(图7)。在东亚地区, 由于俯冲板片(太平洋板块)的后退,向洋迁移的幕式 弧后伸展作用依次导致晚侏罗世—早白垩世松辽陆内 断陷-拗陷盆地的形成、古近纪渤海湾大陆边缘盆地的 发育、新近纪日本海与中国南海等边缘海的扩张以及 第四纪冲绳海槽的弧后伸展[44]。这些弧后裂谷盆地 控制发育了多套同裂谷断陷和拗陷期优质烃源岩和多 个含油气系统[45-47],已被证明具有巨大的油气勘探价 值。目前在塔里木盆地东北部库鲁克塔格地区,也已 证实南华系阿勒通沟组上段和震旦系育肯沟组暗色泥 岩具有较高有机质丰度(TOC 含量可达 3%)^[17],充分 显示该裂谷盆地的烃源岩生成能力和勘探前景。但 是,由于地质和地震资料的限制,对塔里木北部弧后裂 谷盆地向洋迁移的具体过程还缺少精细限定,需要进 一步研究。

4 裂谷对寒武纪早期沉积盆地分布的 制约

越来越多的证据表明,下寒武统下部玉尔吐斯组 和西山布拉克组暗色泥岩、硅质泥页岩是塔里木盆地 深层古生代海相主力烃源岩之一,具有巨大的勘探潜 力^[10-11,48]。在盆缘露头(剖面见图8),这套优质烃源



图 8 塔里木盆地早寒武世玉尔吐斯组沉积期沉积相 Fig. 8 Early Cambrian Yuertusi period lithofacies of Tarim Basin

岩分布广泛,其中阿克苏地区玉尔吐斯组黑色页岩厚 度主体在 10~15 m,有机碳值高达 4%~16%^[48],形成 于受上升洋流控制的中一下缓坡环境^[10-11,48];库鲁克塔 格地区西山布拉克组硅质泥岩和泥岩整体上北厚南薄, 厚度为 8~48 m,有机碳值为 0.63%~2.90%^[17],较高 的硅质含量指示其形成水深很可能大于玉尔吐斯组。 在盆地内部,星火 1 井、尉犁 1 井、塔东 1 井、塔东 2 井、东探 1 井、米兰 1 井和英东 2 井等钻遇了下寒武统 下部烃源岩,其中星火 1 井有机碳值为 1.0%~9.4%, 平均值为 5.5%,尉犁 1 井有机碳值主体为 1.0%~ 3.5%;其他钻穿寒武系或钻遇前寒武系的钻井则缺失 玉尔吐斯组和西山布拉克组,如塔参 1 井、中深 1 井、 方 1 井、和 4 井、巴探 2 井、玛北 1 井和玉龙 6 井,或者 不发育烃源岩,如同 1 井和舒探 1 井(图 8)。

这些下寒武统下部烃源岩分布受寒武纪早期沉积 格局控制。目前普遍认为,塔里木盆地早寒武世为东 盆西台格局,即东部是深水盆地,西部是大规模的碳酸 盐台地^[10-11]。但新的裂谷盆地演化模式和地震解释资 料指示寒武纪早期,塔里木盆地很可能继承南华纪一 震旦纪的构造-沉积格局(图 3),同样显示南北分异的 沉积盆地分布特征(图 8)。

南华纪一震旦纪,塔里木盆地北部发育近 EW 向 的弧后裂谷盆地,在裂谷南部和北部分别形成中部和 北部古隆起[图 3(a)]。震旦纪末期柯坪运动导致塔 里木盆地震旦系与寒武系之间发育广泛的不整合,其 中平行不整合主要分布在盆地北部和露头区(图 2), 超覆型角度不整合则分布在现今中央隆起带北翼 [图 2(c)和图 2 (d)],呈近 EW 向展布^[49],这种分布规 律反映在下寒武统开始沉积时中部古隆起带持续发 育,其北部很可能仍为近 EW 向的沉积拗陷区。同 时,平行不整合的大面积发育也表明塔里木北部震旦 纪末期构造活动较弱,仅表现为整体相对抬升或海平 面相对下降,先前的裂谷构造和地层并没有发生明显 反转和变形,如塔里木盆地北部地震剖面所示(图 2)。 因此,在寒武纪早期,整体受南天山洋被动陆缘伸展作 用控制[图 7(d)],塔里木盆地北部很可能发育近 EW 向展布的玉尔吐斯组沉积期沉积(图 8),被动大陆边缘 可能存在于现今的塔北隆起以北,先前的南华纪弧后裂 谷盆地区域则为继承性拗陷,塔北隆起介于两者之间。 同样地,作为西昆仑洋的被动陆缘,盆地南部沿先存的 南华纪一震旦纪构造发生沉降接受沉积(图 8)^[38]。

事实上,塔里木盆地的东盆西台格局最早形成于 早寒武世肖尔布拉克组沉积期^[12,50],表现为东部深水 盆地被早寒武世至中奥陶统碳酸盐台地的台地边缘带 和台缘斜坡带围限^[11]。因此,用肖尔布拉克组沉积期 及其之后形成的"东盆西台"格局"向后相似"是无法准确得出早寒武世玉尔吐斯组沉积期盆地构造-沉积格局的。相反,早寒武世玉尔吐斯组沉积期盆地具有"向前相似"的分布和演化特征(图8)。由此可以推测,在现今塔里木盆地塔北隆起与中央隆起带之间很可能发育近 EW 向展布、厚度较大的下寒武统玉尔吐斯组沉积期烃源岩。

5 结 论

(1) 塔里木显示南北分异的新元古代裂谷盆地特征,在裂谷充填序列、盆地开启时限、分布形态等方面具 有明显差异。南部裂谷盆地是罗迪尼亚超大陆裂解早期 超级地幔柱活动的产物,开启于南华纪早期(>780 Ma), 呈 NE 向展布,表现为深入塔里木盆地内部的拗拉槽。 而北部裂谷盆地主要与泛罗迪尼亚大洋板片俯冲导致 的弧后伸展有关,开启于南华纪后期(约 740 Ma),呈 近 EW 向狭长带状横穿整个塔里木盆地。

(2)塔里木北部新元古代弧后裂谷盆地和南天山 洋盆的形成、演化过程与东亚地区晚中生代一新生代 弧后裂谷盆地群的形成过程十分相似,均显示向洋迁 移的弧后盆地演化特征。塔里木裂谷从早期的裂谷断 陷经裂谷拗陷最终演化成被动陆缘。

(3) 塔里木新元古代裂谷盆地不仅决定了同裂谷 期烃源岩的分布,更控制了早寒武世沉积盆地和深层 烃源岩的发育位置,使得后者"向前相似"。在现今塔 里木盆地塔北隆起与中央隆起带之间很可能发育近 EW 向展布的南华系一震旦系同裂谷期和下寒武统玉 尔吐斯组与西山布拉克组后裂谷期烃源岩。

致谢 本文得到了中国石油勘探开发研究院张水 昌、张师本,塔里木油田勘探开发研究院杨芝林等的指 导与帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] GUO Zhaojie, YIN An, ROBINSON A, et al. Geochronology and geochemistry of deep-drill-core samples from the basement of the central Tarim Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 25(1):45-56.
- [2] XU Zhiqin, HE Bizhu, ZHANG Chuanlin, et al. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China; new geochronological evidence from deep drilling samples[J]. Precambrian Research, 2013, 235:150-162.
- [3] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志
 [M]. 北京:地质出版社,1993:1-841.
 Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region.
 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-841.
- [4] 贾承造,张师本,吴绍祖. 塔里木盆地及周边地层[M]. 北京:科 学出版社,2004:1-19.

JIA Chengzao, ZHANG Shiben, WU Shaozu. Stratigraphy of the

Tarim Basin and adjacent areas[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-19.

- [5] XU Bei, ZOU Haibo, CHEN Yan, et al. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic[J]. Precambrian Research, 2013, 236:214-226.
- [6] GE Rongfeng, ZHU Wenbin, ZHENG Bihai, et al. Early Pan-African magmatism in the Tarim Craton: insights from zircon U-Pb-Lu-Hf isotope and geochemistry of granitoids in the Korla area, NW China[J]. Precambrian Research, 2012, 212, 213: 117-138.
- [7] GE Rongfeng, ZHU Wenbin, WILDE S A, et al. Neoproterozoic to Paleozoic long-lived accretionary orogeny in the northern Tarim Craton[J]. Tectonics, 2014, 33(3): 302-329.
- [8] TURNER S A. Sedimentary record of Late Neoproterozoic rifting in the NW Tarim Basin, China[J]. Precambrian Research, 2010,181(1/4):85-96.
- [9] GAO Jun, WANG Xinshui, KLEMD R, et al. Record of assembly and breakup of Rodinia in the Southwestern Altaids: evidence from Neoproterozoic magmatism in the Chinese Western Tianshan Orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113(Part 1): 173-193.
- [10] 潘文庆,陈永权,熊益学,等.塔里木盆地下寒武统烃源岩沉积相 研究及其油气勘探指导意义[J].天然气地球科学,2015,26(7): 1224-1232.

PAN Wenqing, CHEN Yongquan, XIONG Yixue, et al. Sedimentary facies research and implications to advantaged exploration regions on lower Cambrian source rocks, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1224-1232.

- [11] 杜金虎,潘文庆.塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与 勘探方向[J].石油勘探与开发,2016,43(3):327-339.
 DU Jinhu,PAN Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(3):327-339.
- [12] 管树巍,吴林,任荣,等.中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油 气勘探前景[J].石油学报,2017,38(1):9-22.
 GUAN Shuwei,WU Lin, REN Rong, et al. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1):9-22.
- [13] LU Songnian, LI Huaikun, ZHANG Chuanlin, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments [J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2):94-107.
- [14] LI Z X. BOGDANOVA S V. COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2):179-210.
- [15] LI Zhengxiang, EVANS D A D, HALVERSON G P. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland[J]. Sedimentary Geology, 2013, 294: 219-232.
- [16] 冯本智,周裕文,迟仕福,等. 新疆库鲁克塔格地区前震旦纪地质 与贵重、有色金属矿床[M]. 北京:地质出版社,1995:1-29.
 FENG Benzhi,ZHOU Yuwen,CHI Shifu,et al. Presinian geology, precious and non-ferrous metal deposits in Kuruktag area, Xinjiang uygur autonomous region, China[M]. Beijing: Geological Publishing House,1995:1-29.
- [17] 黄智斌,王振华,杨芝林,等.库鲁克塔格地区石油地质综合研究 及库车地区野外地质考察基地建设:上卷[R].库尔勒:塔里木油

田公司勘探开发研究院,2009:1-545.

HUANG Zhibin, WANG Zhenhua, YANG Zhilin, et al. Comprehensive study on petroleum geology in Kuruktag area and base construction of field geology investigation in Kuqa area.first volume[R]. Korla: Research Institute of Petroleum Exploration & Development of Tarim Oilfield Company, 2009: 1-545.

- [18] LONG Xiaoping, YUAN Chao, SUN Min, et al. Reworking of the Tarim Craton by underplating of mantle plume-derived magmas: evidence from Neoproterozoic granitoids in the Kuluketage area, NW China[J]. Precambrian Research, 2011, 187(1/2):1-14.
- [19] XU Bei, XIAO Shuhai, ZOU Haibo, et al. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China[J]. Precambrian Research, 2009, 168(3/4):247-258.
- [20] HE Jingwen, ZHU Wenbin, GE Rongfeng, New age constraints on Neoproterozoic diamicites in Kuruktag, NW China and Precambrian crustal evolution of the Tarim Craton[J]. Precambrian Research, 2014, 241:44-60.
- [21] BIALAS R W, BUCK W R, QIN Ran. How much magma is required to rift a continent[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 292(1/2):68-78.
- [22] WANG Jian, LI Zhengxiang. History of Neoproterozoic rift basins in South China; implications for Rodinia break-up[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4):141-158.
- [23] ZHANG Chuanlin, LI Zhengxiang, LI Xianhua, et al. Neoproterozoic bimodal intrusive complex in the southwestern Tarim block, Northwest China: age, geochemistry, and implications for the rifting of Rodinia[J]. International Geology Review, 2006, 48(2): 112-128.
- [24] ZHANG Chuanlin, YANG Dongsheng, WANG Hongyan, et al. Neoproterozoic mafic dykes and basalts in the southern margin of Tarim, Northwest China: age, geochemistry and geodynamic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(3):549-562.
- [25] ZHANG Chuanlin, YE Xiantao, ZOU Haibo, et al. Neoproterozoic sedimentary basin evolution in southwestern Tarim, NW China; new evidence from field observations, detrital zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions [J]. Precambrian Research, 2016,280:31-45.
- [26] ZHANG Chuanlin, LI Zhengxiang, LI Xianhua, et al. Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China: age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(2): 167-179.
- [27] HE Jingwen, ZHU Wenbin, GE Rongfeng, et al. Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Neoproterozoic strata in the Aksu area, northwestern Tarim Craton; implications for supercontinent reconstruction and crustal evolution[J]. Precambrian Research, 2014, 254; 194-209.
- [28] ZHAO P, CHEN Y, ZHAN S, et al. The apparent polar wander path of the Tarim block (NW China) since the Neoproterozoic and its implications for a long-term Tarim-Australia connection [J]. Precambrian Research, 2014, 242; 39-57.
- [29] 张英利,王宗起,闫臻,等.库鲁克塔格地区新元古代贝义西组的构造环境:来自碎屑岩地球化学的证据[J].岩石学报,2011,27(6): 1785-1796.

ZHANG Yingli, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. Tectonic setting of Neoproterozoic Beiyixi Formation in Quruqtagh area, Xinjiang.evidence from geochemistry of clastic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6):1785-1796.

- [30] XU Bei, JIAN Ping, ZHENG Haifei, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China: implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations [J]. Precambrian Research, 2005, 136(2):107-123.
- [31] 姜常义,白开寅,黑爱芝,等. 库鲁克塔格地区火山岩的岩浆过程 与源区组成[J]. 岩石矿物学杂志,2000,19(1):8-18.
 JIANG Changyi, BAI Kaiyin, HEI Aizhi, et al. Petrology, geochemistry, magmatic process and source composition of Sinian-Cambrian volcanic rocks in Kuruktag area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica,2000,19(1):8-18.
- [32] 展新忠,陈川,张晓帆. 新疆库鲁克塔格南华纪火山岩地球化学特征 及其意义[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2013,30(3):354-360. ZHAN Xinzhong, CHEN Chuan, ZHANG Xiaofan. Geology-geochemistry characteristics and its significance of the Nanhua volcanic rock in Quruqtagh Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2013, 30(3): 354-360.
- [33] 张健,张传林,李怀坤,等. 再论塔里木北缘阿克苏蓝片岩的时代 和成因环境:来自锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素的新证据[J]. 岩石 学报,2014,30(11):3357-3365. ZHANG Jian,ZHANG Chuanlin,LI Huaikun, et al. Revisit to time and tectonic environment of the Aksu blueschist terrane in northern

Tarim ,NW China: new evidence from zircon U-Pb age and Hf isotope [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3357-3365.

- [34] HE Zhenyu, ZHANG Zeming, ZONG Keqing, et al. Neoproterozoic granulites from the northeastern margin of the Tarim Craton:petrology, zircon U-Pb ages and implications for the Rodinia assembly[J]. Precambrian Research, 2012, 212, 213, 21-33.
- [35] 邬光辉,张承泽,汪海,等. 塔里木盆地中部塔参1井花岗闪长岩的 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 地质通报,2009,28(5):568-571.
 WU Guanghui, ZHANG Chengze, WANG Hai, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of granodiorite of the Tacan 1 well in the central Tarim Basin, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009,28(5):568-571.
- [36] WANG Xuance,LI Xianhua,LI Zhengxiang, et al. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China; first evidence for >1500 °C mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. Geology, 2007, 35 (12); 1103-1106.
- [37] WANG Xuance, LI Zhengxiang, LI Xianhua, et al. Geochemical and Hf-Nd isotope data of Nanhua rift sedimentary and volcaniclastic rocks indicate a Neoproterozoic continental flood basalt provenance[J]. Lithos, 2011, 127(3/4):427-440.
- [38] 崔海峰,田雷,张年春,等.塔西南坳陷南华纪一震旦纪裂谷分布及 其与下寒武统烃源岩的关系[J].石油学报,2016,37(4):430-438.
 CUI Haifeng, TIAN Lei, ZHANG Nianchun, et al. Nanhua-Sinian rift distribution and its relationship with the development of Lower Cambrian source rocks in the southwest depression of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(4):430-438.
- [39] 石开波,刘波,田景春,等. 塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古 地理[J]. 石油学报,2016,37(11):1343-1360.
 SHI Kaibo,LIU Bo, TIAN Jingchun, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies paleogeography of Sinian in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(11):1343-1360.
- [40] 史仁灯,杨经绥,吴才来,等.北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦 世的 SHRIMP 年龄证据[J].地质学报,2004,78(5):649-657.
 SHI Rendeng, YANG Jingsui, WU Cailai, et al. Late Sinian Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains: evidences from SHRIMP dating[J]. Acta Geologica Sinica,2004,78(5):

649-657.

- [41] 杨海波,高鹏,李兵,等. 新疆西天山达鲁巴依蛇绿岩地质特征
 [J]. 新疆地质,2005,23(2):123-126.
 YANG Haibo,GAO Peng,LI Bing, et al. The geological character of the Sinian Dalubayi ophiolite in the west Tianshan, Xin-jiang[J]. Xinjiang Geology,2005,23(2):123-126.
- [42] XIAO W J, WINDLEY B F, LIU D Y, et al. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China; a Paleozoic-Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia [J]. The Journal of Geology, 2005,113(6):687-705.
- [43] 张元元,郭召杰.甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确 限定及大地构造意义[J].岩石学报,2008,24(4):803-809. ZHANG Yuanyuan,GUO Zhaojie. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu Provinces and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica,2008,24(4):803-809.
- [44] REN Jianye, TAMAKI K, LI Sitian, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344(3/4):175-205.
- [45] 胡见义,牛嘉玉. 渤海湾盆地油气聚集理论和勘探实践的再深 化——为渤海湾含油气盆地发现 40 周年而作[J]. 石油学报, 2001,22(1):1-5.
 HU Jianyi, NIU Jiayu. The further deepening of oil-gas accumulation theory and exploratory practice of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1):1-5.
- [46] 李德生. 松辽盆地的油气形成和分布特征[J]. 大庆石油地质与 开发,1983,2(2):81-89.
 LI Desheng. The geological characteristics of hydrocarbon generation and distribution in the Songliao Basin[J]. Petroleum Geology &. Oilfield Development in Daqing, 1983,2(2):81-89.
- [47] 夏庆龙,徐长贵. 渤海海域复杂断裂带地质认识创新与油气重大发现[J]. 石油学报,2016,37(增刊1):22-33.
 XIA Qinglong,XU Changgui. New geological understandings and major hydrocarbon discoveries in the complex fault zone of Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(S1):22-33.
- [48] 朱光有,陈斐然,陈志勇,等.塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质 烃源岩的发现及其基本特征[J].天然气地球科学,2016,27(1): 8-21.

ZHU Guangyou, CHEN Feiran, CHEN Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1):8-21.

 [49] 何金有,邬光辉,徐备,等. 塔里木盆地震旦系-寒武系不整合面特 征及油气勘探意义[J]. 地质科学,2010,45(3);698-706.
 HE Jinyou, WU Guanghui, XU Bei, et al. Characteristics and petroleum exploration significance of unconformity between Sinian and Cambrian in Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2010,45(3);698-706.

[50] 李朋威,罗平,宋金民,等. 微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素——以塔里木盆地西北缘上震旦统一下寒武统为例[J]. 石油 学报,2015,36(9):1074-1089.

LI Pengwei, LUO Ping, SONG Jinmin, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoirs: a case study of Upper Sinian-Lower Cambrian in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9):1074-1089.

(收稿日期 2016-11-10 改回日期 2017-02-03 编辑 宋 宁)

266