

文章编号: 0253-2697(2017)01-0009-14 DOI:10. 7623/syxb201701002

中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景

管树巍¹ 吴 林¹ 任 荣¹ 朱光有¹ 彭朝全² 赵文韬^{1,3} 李 杰^{1,3}

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院长庆分院 陕西西安 710016;
3. 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘要:利用地质、地球物理和钻井资料编制中国主要克拉通盆地长城系、蓟县系和南华系残余厚度图,初步查明中-新元古代裂谷分布。华北和扬子克拉通中-新元古代裂谷中心以一套由粗快速变细的裂陷层序为标志,从目前的裂谷期地层等时对比格架上判断,现今鄂尔多斯盆地和四川盆地腹部的中-上元古界烃源岩均不如盆地覆盖区外的裂谷中心区域发育。塔里木克拉通南部和北部新元古代裂谷则具有不同的展布特征、形成时间和成因演化,塔里木南部的裂谷活动与以华南大陆(由扬子克拉通和华夏克拉通构成)为中心的地幔柱作用有关,而塔里木北部的裂谷主要形成于罗迪利亚超大陆外侧泛大洋俯冲引起的弧后伸展作用。塔里木南部裂谷开启时间较华南晚约 20~40 Ma,但比塔里木北部提前至少 40 Ma。前寒武纪裂谷演化对早寒武世沉积盆地具有重要的控制,使得后者具有“向前相似”而不是“向后相似”的特点。在塔里木和扬子,早寒武世盆地与南华纪—震旦纪裂谷盆地具有显著的继承性关系;在华北,青白口纪裂谷活动中心向东南缘移位控制了早寒武世盆地的发育位置和海侵方向。就目前的研究程度而言,中国古老克拉通前寒武纪裂谷的类型和分布特征仍显示出动力学上的多样性和复杂性,因而在充填演化和勘探价值研究上也有不同的观点和结论。近期研究除应继续加强地球物理资料处理,以更精细落实盆地覆盖区隐伏裂谷和裂陷外,也应重点开展裂谷期层序识别、地层对比和充填模式建立工作,努力解决前寒武纪裂谷类型及其演化的动力学问题,以恢复与烃源岩沉积阶段的盆地原型,查明烃源岩分布规律。

关键词:前寒武纪;裂谷;超大陆;华北克拉通;塔里木克拉通;扬子克拉通

中图分类号:TE121.1 **文献标识码:**A

Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China

Guan Shuwei¹ Wu Lin¹ Ren Rong¹ Zhu Guangyou¹ Peng Zhaoquan² Zhao Wentao^{1,3} Li Jie^{1,3}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. Changqing Branch of Research Institute, CNPC Geophysical Company Limited, Shaanxi Xi'an 710016, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Geologic, geophysical and drilling data were used to prepare the thickness distribution maps of Changchengian, Jixian and Nanhua systems in China's major craton basins, so as to preliminarily prove the distribution of Precambrian rift. The Precambrian rift centers of North China and Yangtze cratons are embodied by a set of rift sequence rapidly changing from coarse to fine. It is judged from isochronal comparison framework of the existing rifting strata that the Meso-Neoproterozoic source rocks in Ordos Basin and Sichuan Basin hinterland were less developed than the rift center areas beyond the basin coverage. However, the Neoproterozoic rifts in the southern and northern Tarim Basin have different distribution patterns, formation ages and genetic evolutions. The rifting in the southern Tarim Basin was related to the mantle plume effect with South China continent (constituted by Yangtze Craton and Huaxia Craton) as the center, while the rifts in the northern Tarim Basin were mainly formed by the back-arc expanding due to Panthalassa subduction around the Rodinia supercontinent. The rifts in the southern Tarim Basin were opened later than Huanan by 20-40 Ma, but earlier than the northern Tarim Basin by 40 Ma. The Precambrian rift evolution played an important role in controlling the Early Cambrian sedimentary basins, for which the latter is characterized by "forward similarity" rather than "backward similarity". In Tarim and Yangtze areas, Precambrian basins had significant inheritances from Nanhua-Sinian rift basins. In North China, Qingbaikou rifting center migrated towards southeast, controlling the development location and transgressive direction of the Early Cambrian basin. Based on the current researches, the development location, scale and distribution characteristics of Precambrian rift in China's old cratons still show a diversity and complexity in dynamics, leading to different views and conclusions on filling evolution and exploration values. Besides enhancing seismic data processing to further pinpoint concealed rifts within the basin, recent researches should also focus on rifting sequence identification, stratigraphic correlation and filling modeling, attempting to determine the Precambrian rift types and solve evolutionary dynamic problems, so as to restore the basin prototype in the stages closely related to hydrocarbon-generation and prove the distribution laws of source rocks.

Key words: Precambrian; rift; supercontinent; North China Craton; Tarim Craton; Yangtze Craton

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技项目“油气勘探新领域、新理论、新方法、新技术研究”(2014A-02)资助。

第一作者及通信作者: 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

引用:管树巍,吴林,任荣,朱光有,彭朝全,赵文韬,李杰. 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.

Cite :GUAN Shuwei, WU Lin, REN Rong, ZHU Guangyou, PENG Zhaoquan, ZHAO Wentao, LI Jie. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons,China[J]. Acta Petrolei Sinica,2017,38(1):9-22.

板块构造理论认为裂谷代表威尔逊旋回的初始阶段,是地幔柱活动和大陆裂解的产物^[1]。这类裂谷最终可能拉开成洋,两侧的被动大陆边缘盆地既是裂谷演化的一个阶段,也是全球发现油气数量最多的地区^[2-3]。但裂谷的形成和演化在动力学上并非唯一对应于大陆的裂解,板块俯冲作用也可在岛弧后侧形成扩张环境而引发裂谷活动,如太平洋西岸的东北亚中生代-新生代弧后断陷盆地群^[4]、塔里木北部南华纪满加尔裂谷^[5-6]和华北东部待建纪燕辽裂谷^[7](为便于表述,笔者将克拉通边缘或内部较大规模伸展作用形成的狭长沉降区称为裂谷,小规模伸展作用形成的狭长沉降区称为裂陷)都可能属于这种类型。甚至早期消亡的裂谷或裂陷在伸展环境下也会再次活动,近年来在四川盆地安岳特大型气田的发现中,证实中上扬子早寒武世大陆边缘盆地内部发育南北向的古裂陷槽,槽内充填了巨厚的下寒武统筇竹寺组深水相烃源岩,与两侧灯影组白云岩构成优越的源-储配置系统^[8-10]。因此,裂谷或裂陷的成因类型及其控制的油气地质背景和条件是多样的。但中国克拉通与全球典型克拉通相比,规模小,活动性强、后期改造频繁^[11-12],勘探研究应更关注早期裂谷演化对后期克拉通盆地发育位置和沉积格局的控制问题。

目前已证实华北、塔里木和扬子克拉通内部和边缘至少存在十余个中、新元古代裂谷或裂陷^[8-17],主要分布在露头区,盆地覆盖区尚待查明。盆地覆盖区前寒武纪隐伏裂谷和裂陷的识别主要依靠重磁资料,但重磁资料具有多解性,如磁异常可能由裂谷内充填的基性-超基性火山岩引起,也可能由蛇绿岩或岛弧火山岩引起。此外,重磁异常反映的是前寒武纪以来所有时期构造和岩浆活动的叠加,要真实揭示前寒武纪裂谷的原貌,必须“筛分”掉显生宙以来构造和岩浆活动引起的重磁异常,目前很难做到这一点。笔者在前人重磁研究成果基础上,主要利用地震和钻探资料开展了这项工作,编制主要克拉通盆地长城系、蓟县系和南华系等裂谷期层序的厚度分布图,以查明盆地覆盖区前寒武纪裂谷和裂陷的分布形态,在此基础上讨论前寒武纪裂谷演化对早寒武世沉积盆地的控制方式,以及多期裂谷作用控制的烃源岩系列与时代。

1 前寒武纪裂谷地层与构造背景

中国古老的克拉通有华北、扬子和塔里木,三者均

保存了复杂和完整的前寒武纪演化记录,显示出各自独立的前寒武纪演化历史^[11-12]。其中,中、新元古代广泛发育的岩浆作用与裂谷活动(图 1、图 2),是前寒武纪标志性的伸展构造,也被认为是中元古代哥伦比亚超大陆和新元古代罗迪尼亚超大陆裂解事件的响应^[11-17]。

扬子克拉通西缘康滇裂谷和东缘湘桂裂谷的开启时间为 820 Ma^[13,26],内部充填了典型的裂谷盆地沉积序列,Wang 等称之为裂谷成因相组合^[13]。其中湘桂裂谷 820~761 Ma(图 2)之间沉积的板溪群下段为一套由粗快速变细的裂陷层序,这套层序在川西南地区缺失(图 2)。四川盆地共有 5 口井钻穿盖层进入基底,也未钻揭这套层序,威 117 井基底花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 794±11 Ma,成因类型属 A 型花岗岩,形成于伸展构造背景^[32]。Li 等根据全球裂谷岩浆活动事件对比,将华南置于导致新元古代罗迪尼亚超大陆裂解的超级地幔柱中心部位^[17],扬子西缘 820~810 Ma 碧口大火成岩省^[33]和益阳 825 Ma 科马提岩^[34]是该期地幔柱活动的直接标志。康滇裂谷、湘桂裂谷和扬子北缘裂谷可能为华南、澳大利亚、东南极、卡拉哈里和劳伦古陆裂解产物,其中湘桂裂谷可能具坳拉谷性质(图 3)。

塔里木周边和内部均有形成于裂谷环境的新元古代基性岩墙群、侵入体和双峰式火山岩等报道^[20-22]。塔里木南部基性岩墙群和双峰式岩浆岩年龄为 802~783 Ma^[35,36],代表裂谷开启时间的下限;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中^[22],被南华系一震旦系不整合覆盖(图 2),指示北部裂谷在 759 Ma 之前尚未开启,因此塔里木南华纪裂谷开启时间较华南晚约 20~40 Ma。此外,塔里木新元古代地幔柱活动的直接证据,如科马提岩、高镁玄武岩、大火成岩省等典型地幔柱高温产物,至今未见报道。Li 等认为塔里木在罗迪尼亚超大陆中位于边缘部位^[16,17],远离地幔柱中心,这也许是塔里木南华纪裂谷活动时间晚于扬子的主要原因(图 3)。

华北地区中、新元古代岩浆事件主要有 1.8~1.78 Ga 的大火成岩省、1.72~1.62 Ga 的非造山岩浆活动、1.37~1.32 Ga 的镁铁质岩床群、以及约 900 Ma 的镁铁质岩墙群,分布在北缘的白云鄂博裂谷、燕辽裂谷和南缘的熊耳裂谷和徐淮裂谷等中、新元古代裂谷发育区^[15]。Hou 等利用 1.8~1.78 Ga 太行岩墙群的汇聚指向及全球同期岩墙群对比,认为熊耳裂谷是华

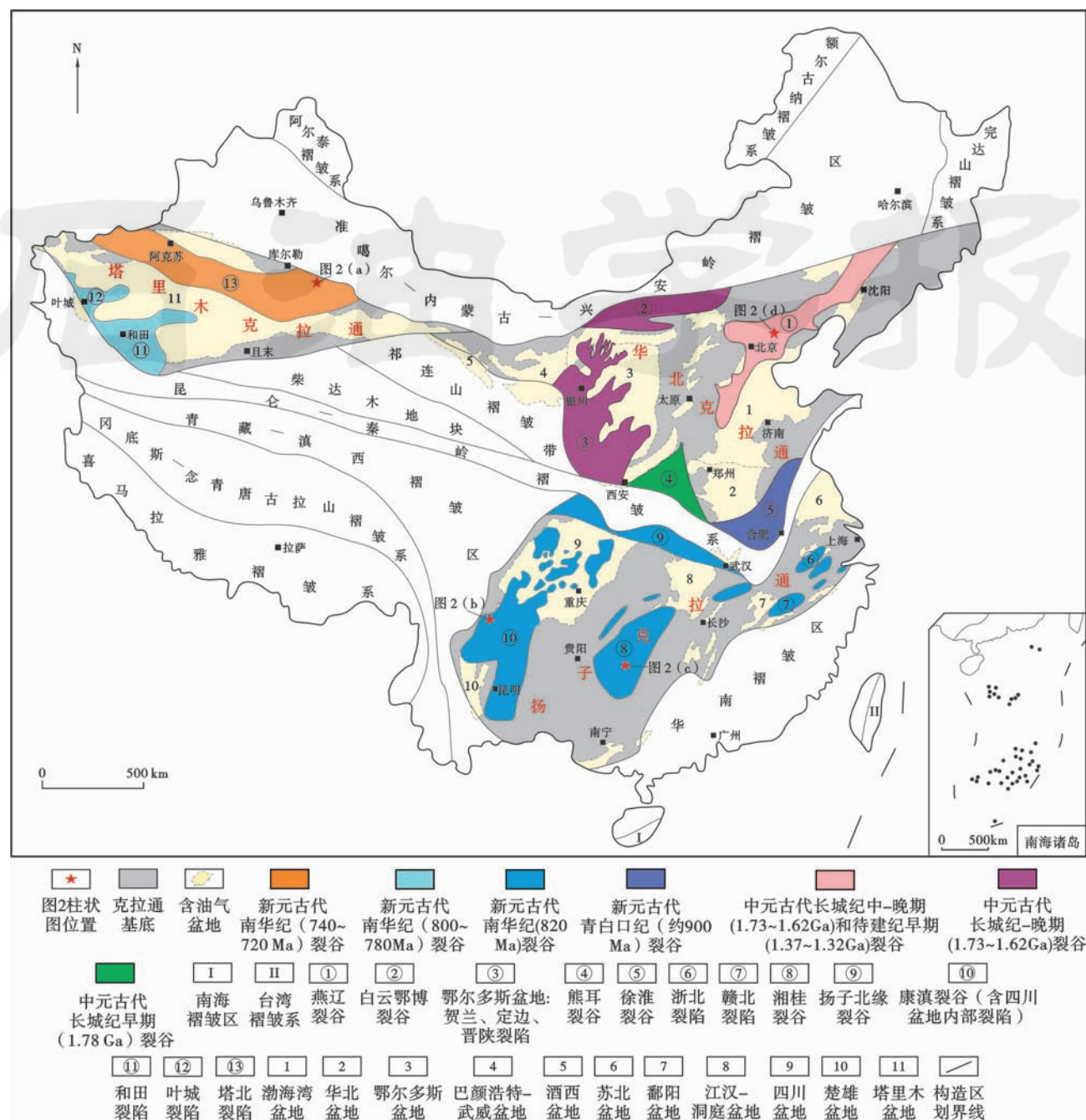


图 1 华北、扬子和塔里木克拉通中-新元古代裂谷和裂陷分布

Fig. 1 Distribution of the Meso-Neoproterozoic rifts in the North China, Yangtze and Tarim cratons

北克拉通与印度克拉通裂离的产物^[14]; Peng 等利用约 900 Ma 大石沟岩墙群的汇聚指向及全球同期岩墙群对比,认为徐淮裂谷是华北克拉通和刚果-圣弗朗西斯科克拉通裂离的产物^[37]。Wan 等最近报道了华北北缘长城纪榴辉岩与西伯利亚西南缘同时代榴辉岩具有相同的俯冲-折返-造山的演化特征,具有可对比性^[38],因此白云鄂博裂谷和燕辽裂谷可能与华北克拉通和西伯利亚西南缘裂离有关。

综上所述,华北、扬子和塔里木克拉通在中、新元

古代的裂谷活动及相关的岩浆事件主要发生在长城纪、蓟县纪、青白口纪和南华纪,这几个时期的地层分布可基本反映该期裂谷或裂陷的分布(图1)。

2 主要盆地前寒武纪裂谷与裂陷分布

2.1 四川盆地

四川盆地在航磁资料上表现为 NE 向展布的宽缓正磁异常夹较弱负磁异常,其中南华纪裂谷为“两正夹一负”特征,航磁异常陡变区对应于裂谷主边界断裂位

置^[39]。在四川盆地中部高石 1 井—磨深 1 井区三维地震资料上,震旦系灯影组以下可识别出明显的裂隙构造,内部为层状反射,底界为一套断续延伸的强振幅

波组^[39],可能是南华系与变质基底之间的不整合面。依据这套波组,结合重、磁资料,编制了四川盆地南华系厚度图(图 4)。

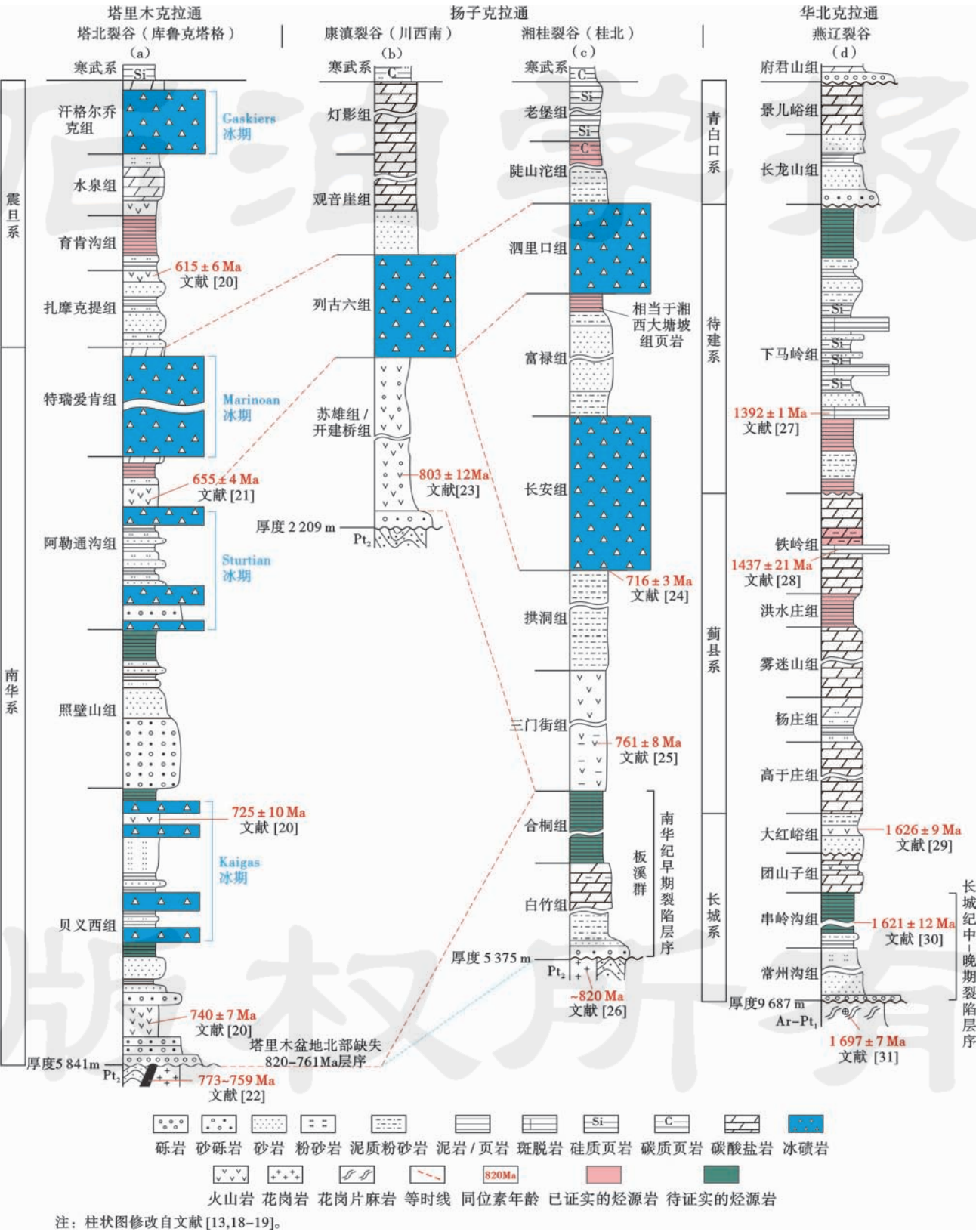


图 2 华北、扬子和塔里木克拉通中-上元古界对比(柱状图位置见图 1)

Fig. 2 Meso-Neoproterozoic correlation in the North China, Yangtze and Tarim cratons

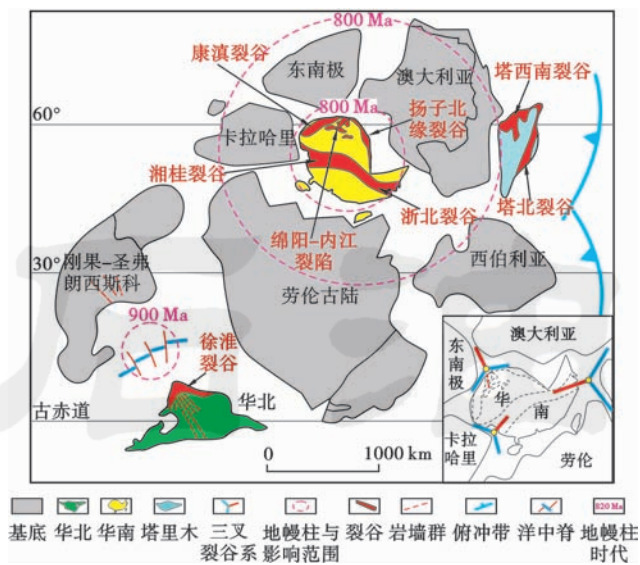


图 3 中国克拉通新元古代裂谷与罗迪尼亚超大陆裂解响应模式(岩墙群和古板块资料据文献[16-17,37])
Fig. 3 Neoproterozoic rifts in the Chinese cratons and their responses to Rodinia break-up

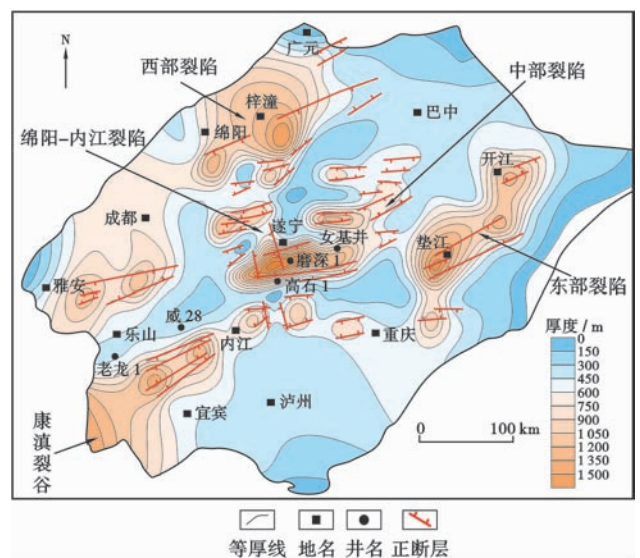


图 4 四川盆地南华系残余厚度
Fig. 4 Residual thickness of Nanhuan system in Sichuan Basin

四川盆地南华系大致存在 3 个 NE 向断续延伸的沉积加厚区,显示出明显的裂陷沉积特征。西部裂陷沿雅安—成都—梓潼—一线分布,最大沉积厚度位于梓潼地区,达 1 500 m;中部裂陷沿宜宾—遂宁—巴中—一线分布,最大沉积厚度位于磨深 1 井区,超过 2 000 m;东部裂陷沿重庆—垫江—开江—一线分布,最大厚度位于垫江地区,超过 1 500 m。这 3 条裂陷形似“川”字,其中以中部裂陷发育程度最高,延伸最长,内部发育一系列雁列排布的次级断裂,与主裂陷走向呈一定的锐夹角相交,这一现象与 Reykjanes 裂谷及 Gulf 裂谷类

似^[40]。此外,绵阳和内江之间可能还发育一条近南北延伸的裂陷,发育程度较低,没有贯穿盆地,其东、西两侧也未发现与之平行的裂陷。这条近 SN 向裂陷与西部和中部的 NE 向裂陷似乎呈交切关系,其成因尚难定论,但两组方向的裂谷可能并非区域应力场产物,克拉通内部的局部薄弱带(如火山口)可能影响裂谷走向,这一现象在 Hawaii 裂谷已有报道^[41]。在盆地西南部,南华系有逐渐加厚现象,且厚度等值线在雅安、乐山和宜宾地区由 NE 向转为近 SN 向,而该地区正位于扬子西缘 SN 向康滇裂谷的北端,因此,四川盆地内部 NE 向南华纪裂陷可能与扬子克拉通西缘的康滇裂谷相接,并属于康滇裂谷的一部分。

2.2 塔里木盆地

目前塔里木盆地钻遇南华系、震旦系和基底的井有 30 口,而钻遇南华系碎屑岩的井仅有尉犁 1 井(图 5)。地震资料上前寒武纪地层和构造的标志反射有两类:①以塔北隆起为代表的较连续、弱振幅席状反射,星火 1 井证实为震旦系,而缺失震旦系的地区(如塔中隆起)则主要表现为杂乱发射;②塔北隆起和塔中隆起之间的楔状反射,为识别南华纪裂谷的主要标志^[42]。在塔北隆起东南缘,楔状体内部可见层状反射向西北方向超覆^[42],可能反映裂谷盆地的边界位置;另在巴楚隆起以北至塔北隆起之间以及塔西南地区,也可识别出此反射特征。因此利用此楔状地震反射可大致确定出南华系地层和南华纪裂谷的分布(图 5)。

塔里木盆地的南华系沉积约占盆地面积的 30%,盆地北部南华系呈带状展布,宽度 100~200 km,近 EW 向贯穿整个盆地,厚度由盆地内部向东北缘和西北缘逐渐增加,最大厚度超过 2 000 m。盆地南部南华系在和田和叶城地区存在两支,均呈 NE 向展布,深入盆地内部,宽度 100~200 km,厚度由盆内向盆缘逐渐加大,最大厚度超过 1 600 m,其中和田地区的一支向盆地内部延伸较远,可达塔中—巴东地区。南华系的这种分布特征揭示了塔里木克拉通新元古代裂谷的分布规律,即北部可能发育一个 EW 走向的大型陆内裂陷,南部发育两个 NE 走向的陆内裂陷。

2.3 鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地长城系内部构造非常复杂,除少数地震测线外,长城纪裂陷和边界断裂通常难以精确识别。但目前钻揭长城系的井较多,共有 30 口,其中 3 口井钻穿长城系,17 口井钻遇长城系但未钻穿,这些井主要位于盆地中部和西南部;另有 10 口井钻揭基底但缺失长城系,这些井主要位于盆地北部和东部。因此利用这些钻井的约束,采取地震和重、磁资料联合解释的方法,仍可较为可靠地确定出长城系的厚度分布(图 6)。

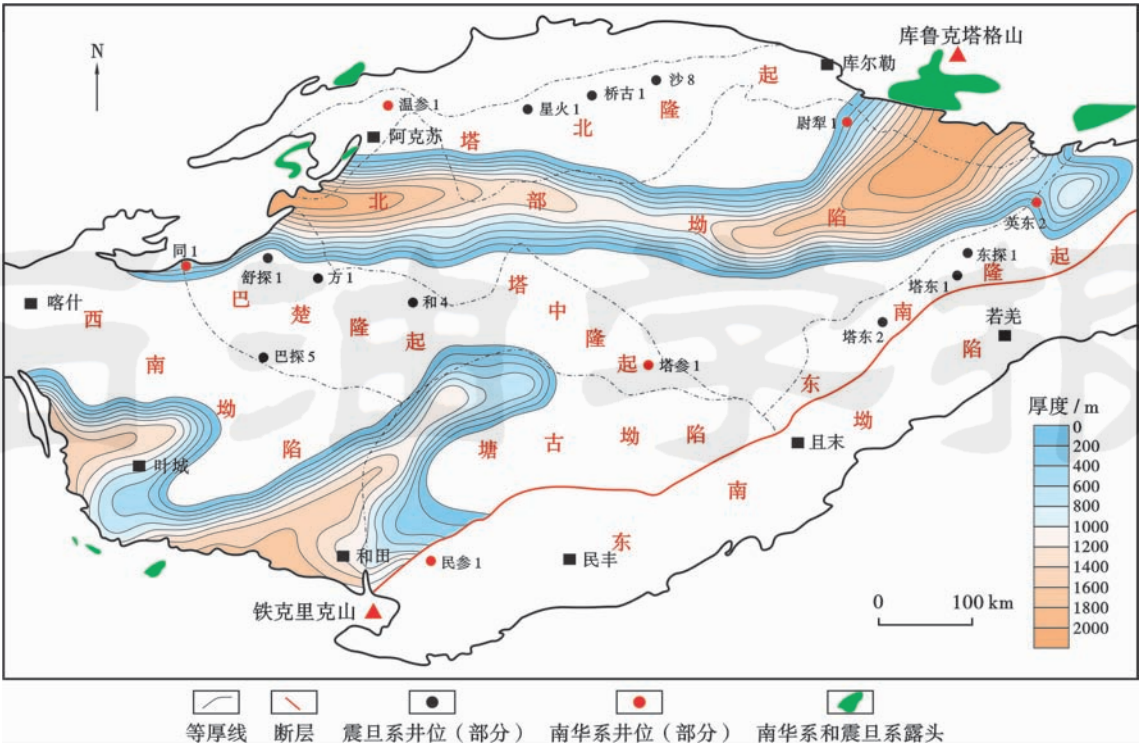


图 5 塔里木盆地前寒武纪楔状反射分布(示南华系厚度)
Fig. 5 Distribution of the wedge reflections of Precambrian in Tarim Basin

鄂尔多斯盆地长城系呈明显的堑-垒相间的裂陷沉积特征,裂陷槽呈 NE 向展布,有多个分支,内部长城系由 SW 向 NE 向减薄直至缺失。此外,钻探证实鄂尔多斯盆地内部缺失界待建系、青白口系、南华系、震旦系和下寒武统。

3 前寒武纪裂谷演化对早寒武世沉积盆地的控制

早寒武世盆地孕育了中国海相油气的重要烃源岩——四川盆地的下寒武统筇竹寺组和塔里木盆地的下寒武统玉尔吐斯组。四川盆地早寒武世古裂陷槽的发现更是凸显了前寒武纪裂谷演化对早寒武世盆地沉积格局的控制作用。

3.1 早寒武世盆地对前寒武纪裂谷的继承性演化

3.1.1 扬子克拉通

扬子克拉通南华纪裂谷演化可分为 3 个阶段。第 1 阶段在湘桂地区以一套由粗变细的快速裂陷层序为标志[图 2(c)],底部是洪积扇相和滨浅海相,中部是淹没碳酸盐台地相,上部是欠补偿盆地相[图 7(a)]^[13]。合桐组上覆三门街组获得的辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 $761 \pm 8 \text{ Ma}$ ^[25],代表这套裂陷层序的上限年龄[图 2(c)]。而在康滇裂谷和四川盆地内部裂陷槽,则充填了大陆裂谷环境双模式火山岩和 A 型花岗岩^[32],前者锆石 U-Pb 年龄为 $803 \pm 12 \text{ Ma}$ ^[23],后者为 $794 \pm 11 \text{ Ma}$ ^[32],

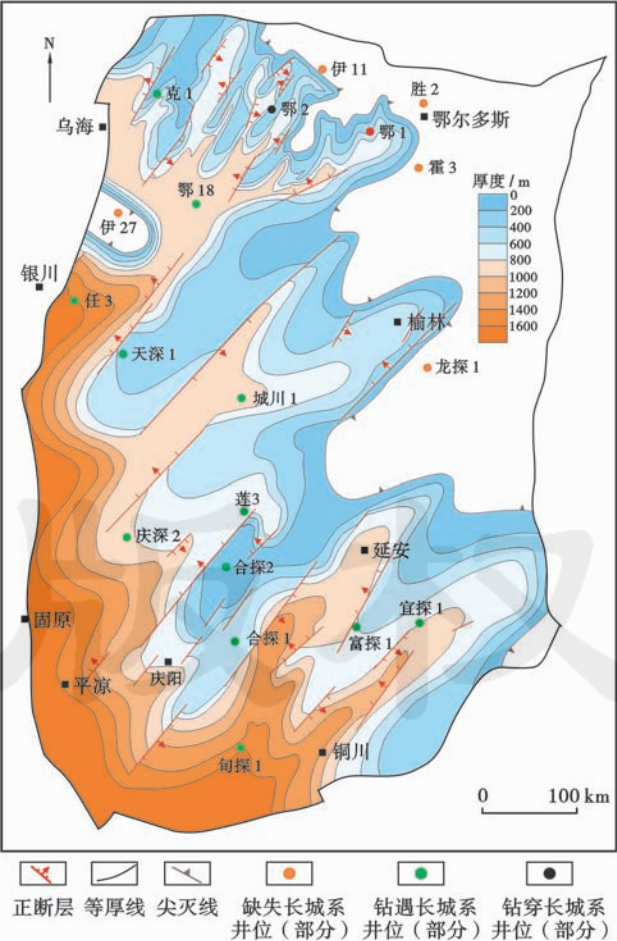


图 6 鄂尔多斯盆地长城系残余分布
Fig. 6 Residual thickness of Changchengian System in Ordos Basin

基本与湘桂地区的裂陷层序同期。第 2 阶段在湘桂地区以三门街组水下喷发的海相火山岩组合为特征[图 2(c)]^[13]，川西南及康滇地区仍以双模式火山岩喷发为主[图 2(b)]。第 3 阶段为拗陷阶段，裂谷岩浆与

火山活动显著减弱，以冰期和间冰期沉积为特征^[13]，其中湘桂地区间冰期沉积的富禄组(桂北)[图 2(c)]、鹤岭组(湘西南)和大塘坡组(湘西)下部为一套含锰的黑色碳质页岩^[13,44]。

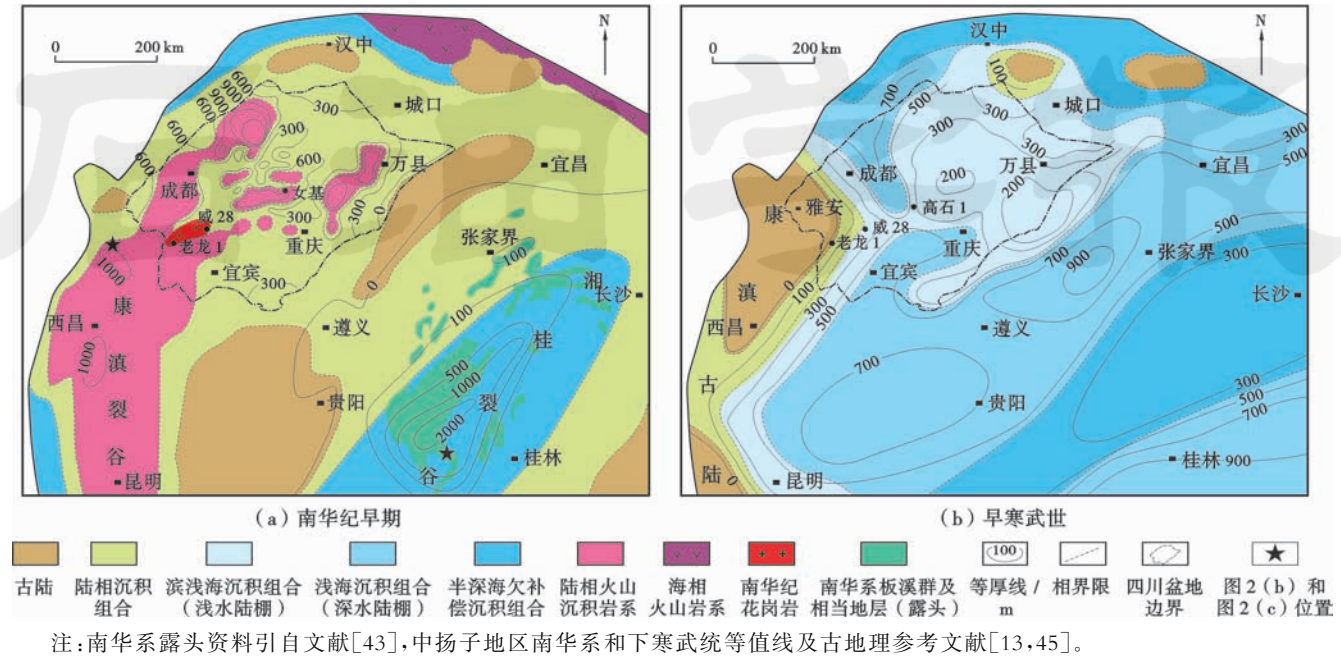


图 7 中-上扬子地区南华纪早期和早寒武世构造古地理

Fig. 7 Tectonic paleogeography evolution from early Nanhuan to early Cambrian in the middle and upper Yangtze region

扬子克拉通新元古代裂谷活动在震旦纪结束^[13]，早寒武世古地理格局是继晚震旦世海退后又一次较大规模海侵背景下发展而成的，整体表现为西高东低，海水可能自东南和西北方向侵入[图 7(b)]^[10,45]。西部为康滇古陆，向东海水加深，四川盆地位置为浅水砂泥质陆棚沉积相，勘探已证实其内部发育了一个向北开口的 NNW 向裂陷槽。此外，在四川盆地东南的宜宾—重庆一线，存在另一个规模较小的 NE 向“沟槽”，槽内下寒武统最大厚度 500~600 m[图 7(b)]。而在中扬子地区，昆明—遵义—张家界—宜昌一线则存在另一个规模更大、NE 向延伸的下寒武统加厚区，宽 150~200 km，厚 500~1000 m^[45]。但在南华纪裂陷作用最强、沉积最厚的湘中和桂北地区，下寒武统的沉积厚度却最薄[图 7(b)]，可能反映一种深水欠补偿沉积环境，恰恰印证了南华纪裂谷对早寒武世沉积盆地的控制。

3.1.2 塔里木克拉通

(1) 南华纪—震旦纪

塔里木北部南华纪裂谷呈狭长带状，呈 EW 向贯穿整个盆地，而塔里木南部裂谷则呈 NE 向展布，表现为深入克拉通内部的拗拉槽特征(图 5)，两者反映出明显不同的成因与演化机制。

塔里木南部基性岩墙群和双峰式火山岩锆石 U-Pb 年龄为 802~783 Ma^[35-36]，代表南部裂谷开启时间的下限[图 8(a)]；塔里木东北库鲁克塔格地区南华系下部贝义西组底部火山岩锆石 U-Pb 年龄为 740 ± 7 Ma^[20]，代表北部裂谷的开启时间[图 8(b)]，因此塔里木南部裂谷开启时间较北部至少提前 40 Ma。在新元古代罗迪尼亚超大陆中，塔里木位于边缘位置，南部面向超大陆内部，北部面向泛大洋^[16-17]，因此南部可能较北部更早受到以华南为中心的地幔柱作用^[17,33-34]的影响而发生裂谷活动(图 3)。塔里木北部裂谷则可能与罗迪尼亚超大陆外侧泛大洋俯冲引起的弧后伸展作用有关[图 8(b)]，星火 1 井钻遇和库鲁克塔格西段出露的约 830~660 Ma 的花岗岩，富集大离子亲石元素，亏损高场强元素，呈现岛弧型地化特征^[6,46]。在南华纪晚期以后(<720 Ma)，由于俯冲带向大洋迁移和弧后伸展作用的持续，伊犁、中天山等地体从塔里木裂离，南天山洋开始张开并导致塔里木北缘进一步演化为被动大陆边缘^[47][图 8(b)]，这一过程与中国东部中生代松辽盆地和日本海的形成类似^[4]。

塔里木在震旦纪可能继承了南华纪沉积格局。冈瓦纳大陆的聚合^[16-17]在塔里木可能表现为震旦系与寒武纪之间的不整合，其中平行不整合主要分布在盆

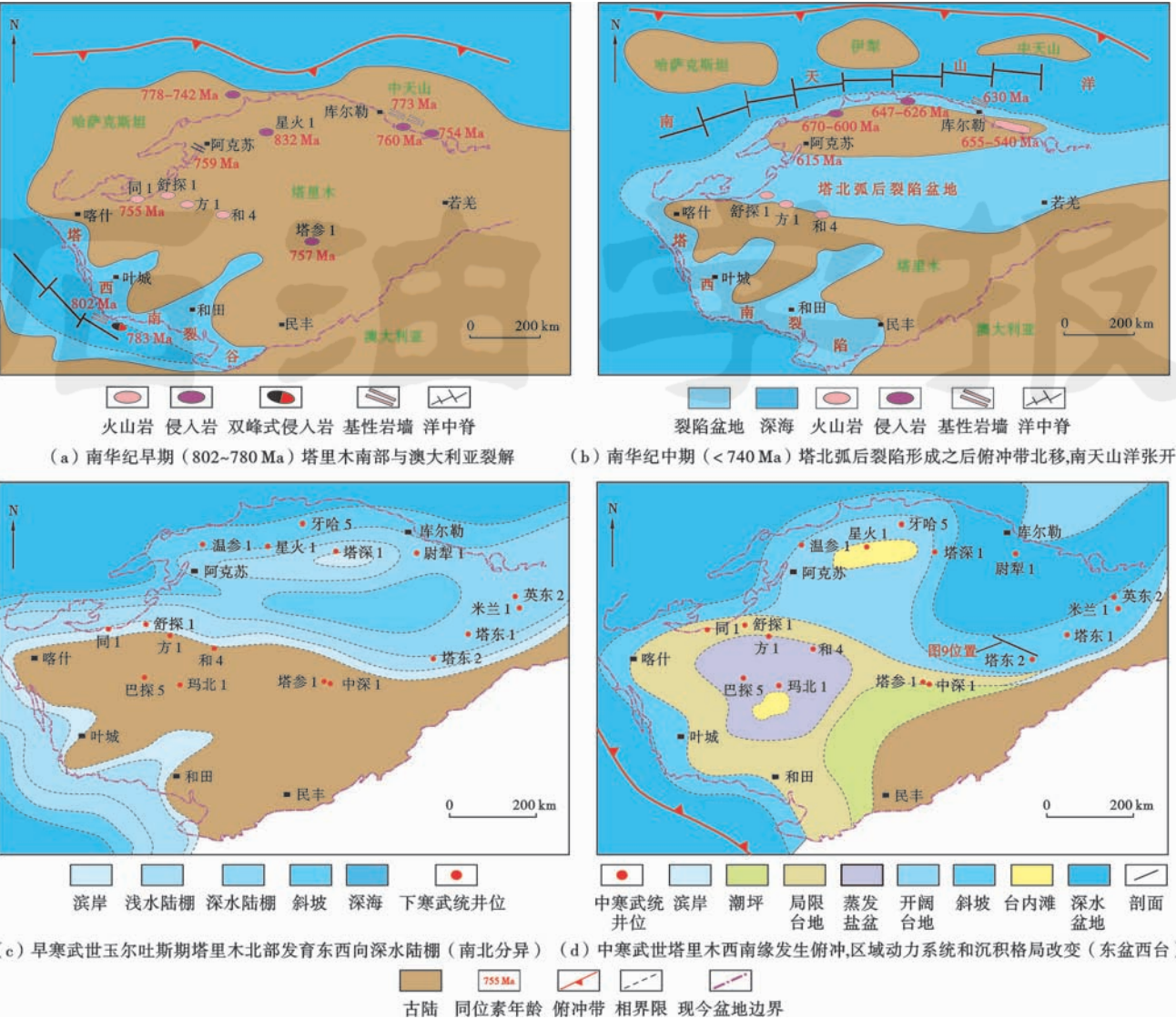


图 8 塔里木克拉通南华纪至早寒武世裂谷和盆地演化(同位素年龄引自文献[20-22,35,36,46])

Fig. 8 Rifts and basin evolution from Nanhuan to Early Cambrian in Tarim craton

地北部及露头区,角度不整合则分布在现今中央隆起带北翼^[48],这种分布规律也指示了塔里木在震旦纪构造格局具有南北分异的特征。

(2) 早-中寒武世

塔里木北部在早寒武世玉尔吐斯组沉积期仍继承了南华纪和震旦纪沉积格局,发育近 EW 向展布的深水陆棚区[图 8(c)],大致位于现今塔北隆起和中央隆起带之间。塔里木南部则仍沿着先存的南华纪构造发生沉降接受沉积[图 8(c)]。至中寒武世,塔里木西南缘由被动陆缘转化为活动陆缘^[49],来自西南缘的挤压导致盆地西南部抬升,大范围出现潮坪相、局限台地相和蒸发盐盆相,以白云岩沉积为主^[50];而盆地北部的深水陆棚区则由 EW 向转变为 NE 向,整个盆地开始出现“东盆西台”格局[图 8(d)]。其中英东—罗西地区处于克拉通边缘位置,构造变动更大,海岸带由 NE

向转变为 NNE 向,直至演变为奥陶纪近 SN 向的台缘斜坡带。因此,现今塔东北地区的沉积相带展布并非其原始面貌,而是后期改造和移位所致。

目前普遍认为,下寒武统玉尔吐斯组沉积期的古地理格局也为“东盆西台”,即盆地东部是近南北延伸的欠补偿盆地相,盆地西部是碳酸盐台地相^[50]。但从大剖面 Z1300 看(图 9),满加尔凹陷的寒武系向东存在着明显的逐层超覆和减薄现象。这一现象说明,现今的塔东凸起位置在寒武纪水体较浅,可能接近古海岸,而不是位于欠补偿盆地内。事实上,塔里木盆地东部典型的欠补偿盆地相出现在中寒武世之后,被中-晚寒武世至奥陶纪碳酸盐台地的台缘斜坡带所严格围限。此外,从中寒武世开始,由于来自塔西南地区的盆地动力系统发生了改变^[49],因此用中-晚寒武世和奥陶纪“东盆西台”格局去推断早寒武世玉尔吐斯组沉积

期盆地的沉积面貌可能是不可靠的。

这个结论在扬子克拉通已得到印证,上扬子地区(四川盆地)早寒武世筇竹寺组沉积期发育近 SN 向的裂陷槽^[8-10],向北(川西北地区)规模变大,沉积增厚^[51-53],但至早寒武世龙王庙组沉积期及中-晚寒武世,这条裂陷槽消失,古地理格局陡然呈现出 NW 高、SE 低的形态^[54]。塔里木和扬子克拉通在寒武纪的演化属于冈瓦纳大陆聚合过程的一部分^[17,55],两者具有

亲缘性,早寒武世晚期以来的构造和沉积格局变化表明,下寒武统玉尔吐斯组和筇竹寺组这两套最重要的烃源岩沉积时的盆地格局与之后的盆地格局并不具有相似性。

塔里木南华纪南北迥异的裂谷分布形态与航磁异常反映出的基底构造格局是相符的,这种格局控制了早寒武世沉积盆地的分布,使得后者“向前相似”,而不是“向后相似”。由此可以推测,在现今塔里木盆地中央隆起带与塔北隆起之间可能发育近 EW 向展布的南华系和下寒武统玉尔吐斯组烃源岩。

3.2 裂谷中心移位对早寒武世盆地发育位置的控制

华北中、新元古代多期裂谷作用与裂谷活动中心移位现象非常典型。长城纪早期的大火成岩事件伴有大规模的 1.8~1.78 Ga 基性岩墙群,呈放射状几何形态,收敛于华北南缘栾川—熊耳地区[图 10(a)],代表了裂谷活动中心位置^[14-15]。在待建纪,燕辽地区沉积了下马岭组,广泛伴有 1.37~1.32 Ga 基性岩席侵入^[15],代表了华北克拉通待建纪的裂陷活动。而在青白口纪,华北中部和东部的约 900Ma 大石沟基性岩墙群,也呈现放射状几何学形态,汇聚中心位于东南缘的徐淮地区^[37][图 10(b)]。

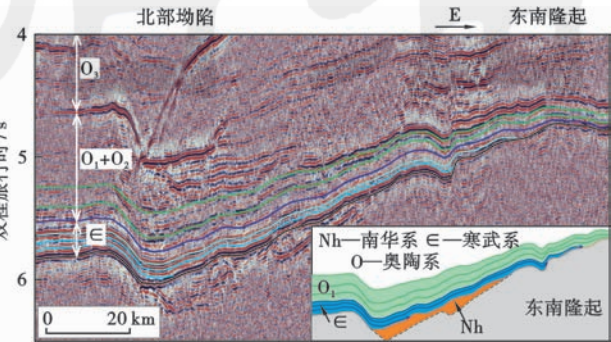


图 9 塔里木盆地北部拗陷寒武系向东(古陆)超覆减薄现象(剖面位置见图 8)

Fig. 9 Overlapping and thinning phenomena of Cambrian in the eastern Tarim Basin

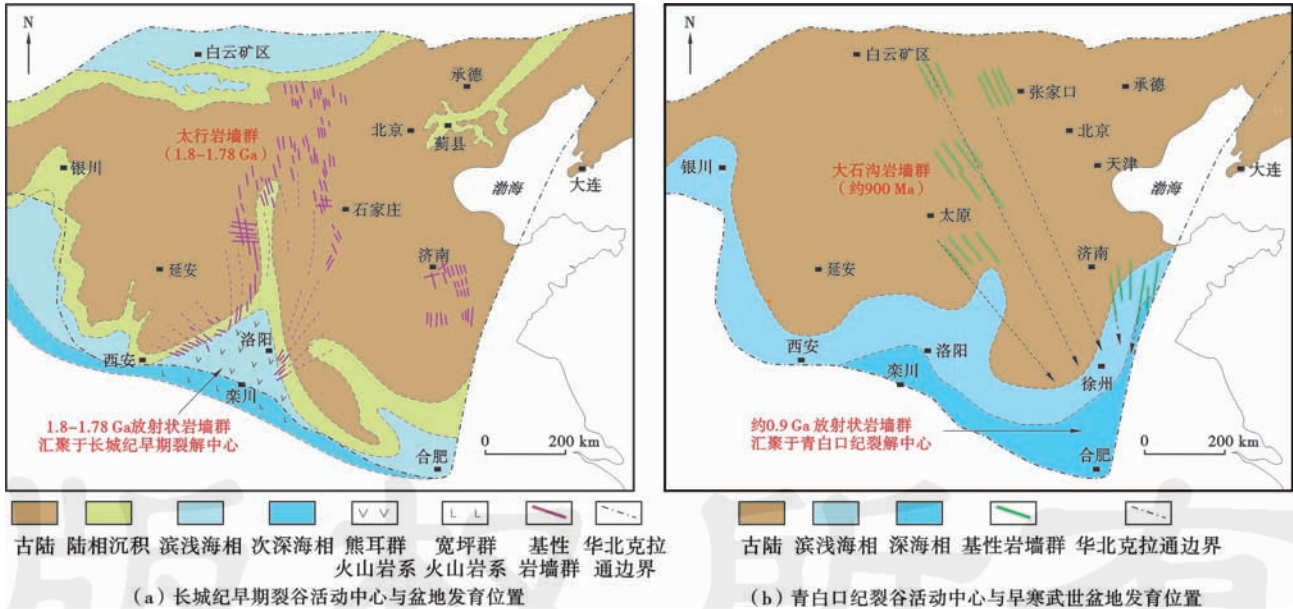


图 10 华北中元古代—寒武纪裂谷中心移位与盆地分布(岩墙群和古地理参考文献[14,37,56-58])

Fig. 10 Relocation of rifting centers in Mesoproterozoic-Cambrian and its control on basin distribution in the North China

因此,华北克拉通中、新元古代裂谷活动中心存在着显著的移位。长城纪早期位于华北南缘的栾川—洛阳地区,待建纪移位至北部燕辽地区,青白口纪则移位至东南缘的徐淮地区。裂谷活动中心的移位是导致华北中元古代、新元古代和寒武纪盆地在垂向上缺少叠合性的主要机制。青白口纪的裂谷

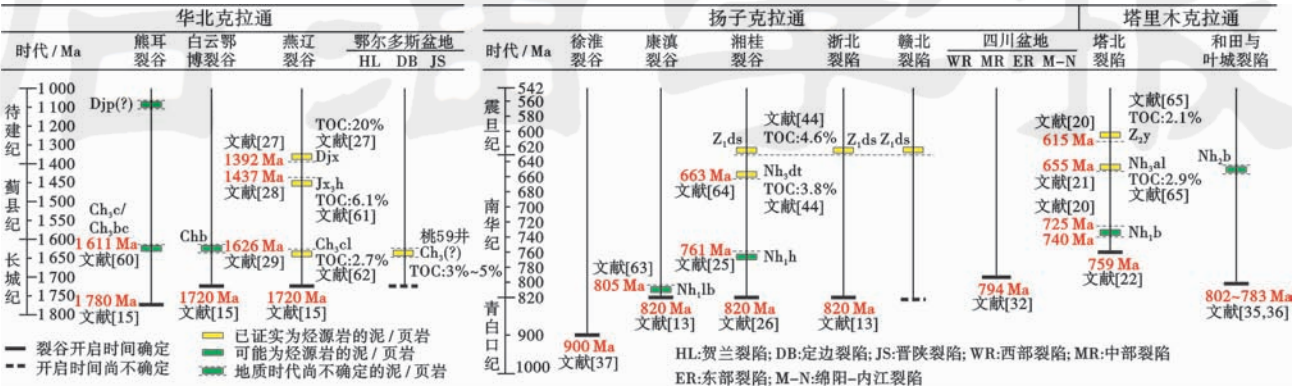
中心转移至东南缘,自此使得华北古陆呈现出北高南低、西高东低的形态,震旦纪和早寒武世沉积盆地均是首先形成在华北东南缘^[56],然后向北西扩展,直至中寒武世,海水才淹没华北古陆西部,这是鄂尔多斯盆地缺失下寒武统及其含油气系统的主要原因。

4 前寒武纪多期裂谷作用控制的烃源岩系列与油气远景

4.1 烃源岩系列与时代

目前已证实华南上元古界较高有机质丰度的烃源岩主要位于大塘坡组[相当于桂北地区富禄组,图 2(c)]和震旦系陡山沱组(图 11)^[13,44,59],均发育在南华纪裂

谷作用最强的湘桂地区[图 7(a)]。此外湘桂地区 820~761 Ma 沉积了一套由粗快速变细的裂陷层序[图 2(c)],上段合桐组属欠补偿盆地相,由黑色碳质页岩及含黄铁矿页岩组成^[13],可开展进一步的烃源岩评价。前已论述,在湘桂地区合桐组黑色页岩沉积期,现今四川盆地、川西南和康滇裂谷北段充填的是大陆裂谷环境双模式火山岩和侵入岩,而不发育欠补偿盆地相的黑色岩系。



注:Ch₃bc/Ch₃c—长城系白草坪组/崔庄组;Ch₃cl—长城系串岭沟组;Chb—长城系白云鄂博群;Ch₃—长城系;J_xh—蓟县系洪水庄组;Djp—待建系蓟峪组;Djx—待建系下马岭组;Nh₁lb—南华系柳坝塘组;Nh₁h—南华系合桐组;Nh₁b—南华系贝义西组;Nh₂b—南华系波龙组;Nh₃dt—南华系大塘坡组;Nh₃al—南华系阿勒通沟组;Z₁ds—震旦系陡山沱组;Z₂y—震旦系育肯沟组;(?)—时代待定。

图 11 前寒武纪多期裂谷作用控制的烃源岩系列与时代(图中裂谷名称与图 1 对应)
Fig. 11 Source rocks controlled by multi-stage rifting in Precambrian and their ages

塔里木北部裂谷的开启时间为 740 Ma^[20],因此也缺失与华南湘桂地区合桐组同期的黑色岩系。目前证实的塔里木上元古界较高有机质丰度烃源岩主要位于南华系阿勒通沟组上段和震旦系育肯沟组,以黑灰—黑色泥岩为主^[65][图 2(a)]。阿勒通沟组上段凝灰岩夹层的锆石 U-Pb 年龄为 655 ± 4 Ma^[21],与华南大塘坡组底部凝灰岩的年龄值 663 ± 4 Ma^[64]相当,两者都属间冰期沉积。

华北中、上元古界较高有机质丰度烃源岩位于燕辽地区的蓟县系洪水庄组、铁岭组以及待建系下马岭组[图 2(d)]^[27,61]。其中铁岭组斑脱岩得到 1 437 ± 21 Ma 的锆石 U-Pb 年龄^[28],下马岭组凝灰岩层得到 1 399 ± 1 Ma 的锆石 U-Pb 年龄^[27]。此外,燕辽地区长城纪裂谷在开启初期也以一套由粗变细的裂陷层序为标志,这套层序上部的串岭沟组发育暗色泥岩、页岩和细碎屑沉积,含丰富的微生物化石,最高 TOC 达 2.36%^[62]。鄂尔多斯盆地最近完钻的桃 59 井在长城系钻遇 3 m 的黑色碳质泥岩,可开展进一步的烃源岩评价。孙会一等在长城系串岭沟组上部凝灰岩获得的锆石 U-Pb 年龄为 1 621 ± 12 Ma^[30],属长城纪晚期沉积。

华北中、上元古界烃源岩以待建系下马岭组研究

程度较高。下马岭组主要分布于燕山地区和太行山北段,蓟县地区沉积厚度最大,向东迅速减薄,至锦西、兴城一带完全尖灭^[66]。但下马岭组只在燕辽地区得到精确的同位素年龄确认,华北其他地区是否发育与下马岭组同期烃源岩仍需进一步工作。范宏瑞等报道了白云鄂博矿区 1.4~1.2 Ga 的火成碳酸岩脉,与燕辽地区 1.37~1.32 Ga 的辉绿岩席时代相当^[15,67],反映华北北缘西段也存在与燕辽地区同期的裂谷岩浆活动,并可能沉积了待建系。在华北东南缘,牛绍武和辛后田认为安徽淮北地区史家—黑峰岭剖面史家组在岩性特征、叠层石组合和藻类化石等方面可与燕辽地区下马岭组对比^[68]。而在华北西部,鄂尔多斯盆地已有 50 余口井钻揭基底和元古界,证实缺失待建系。

4.2 油气勘探前景

华北、扬子和塔里木克拉通内部的七大盆地——渤海湾、鄂尔多斯、南华北、苏北、江汉、四川和塔里木盆地,无疑是寻找中新元古界油气的现实地区。从这 7 个盆地与中新元古代裂谷的叠置关系来看(图 1),只有塔里木盆地基本完整保存了塔里木克拉通在南华纪的裂谷活动与沉积记录,而其他 6 个盆地与所在克拉通中新元古代裂谷的叠置范围很小。

由于缺乏足够的、有同位素年龄和化石年龄约束

的中新元古界控制剖面,目前对这 3 个克拉通中新元古界有利烃源岩分布仍缺乏深入了解。但华南地区中新元古界层序和岩浆事件的等时对比表明[图 2(b)和图 2(c)],南华系和震旦系高有机质丰度的烃源岩主要发育在湘桂裂谷中心区域。这一规律同样适用于华北,熊耳裂谷、燕辽、白云鄂博和徐淮裂谷的中心均位于鄂尔多斯、渤海湾和南华北等主要含油气盆地的边缘或外围,并在显生宙经历了造山作用。但在鄂尔多斯盆地内部,桃 59 井在长城系钻遇 3m 黑色碳质泥岩,远小于燕辽裂谷和熊耳裂谷内可能去之同期的串岭沟组与崔庄组黑色泥岩厚度(图 11),因此,向克拉通内部逐渐减弱的裂陷活动仍然控制着克拉通边缘部位有利烃源岩的发育,并被中生代陆相盆地保存下来,成为油气勘探的对象。

华北克拉通在新元古代末至早中生代基本处于相对稳定的地台状态^[69],但自晚中生代以来,华北东部发生了高热流背景下岩石圈地幔的减薄与物理化学性质的根本改变^[70-71],克拉通的稳定性遭到破坏,并在早白垩世(~ 125 Ma)达到高峰^[70],出现大量伸展构造,如渤海湾、南华北和胶莱等一系列断陷盆地群的形成(图 1)。华南东部也同期发育了相同性质、但规模较小的断陷盆地群,形成独特的华南盆岭构造^[72]。但在这两个克拉通的西部,磷灰石裂变径迹(AFT)数据表明鄂尔多斯和四川盆地几乎同时自晚白垩世以来处于隆升和降温状态^[73-74],并缺失新生代沉积。因此,晚中生代以来华北和华南西部相对东部地区具有较低的地温梯度和较高的构造稳定性,将导致中新元古界烃源岩热演化在东西方向上出现显著的差异。这种差异对中新元古界烃源岩热演化与油气聚集的影响尚缺乏深入研究,但西部地区同期处于稳定抬升和降温状态,可能使得深埋的中新元古界烃源岩仍处于生烃窗内。

在塔里木北部,南华纪罗迪利亚超大陆外侧泛大洋俯冲产生的弧后裂陷盆地位于现今塔北隆起和中央隆起带之间(图 8),并被完整保存了下来。虽然塔里木东北缘中新元古界烃源岩 TOC 指标远逊于华北和华南(图 11),但是较低的研究程度和较完整的保存状态仍可能使之在未来的中新元古界油气地质评价中后来居上。此外,与中东部的华北和华南相比,塔里木在中生代地温梯度更低(现今地温梯度为 $2.0^{\circ}\text{C}/\text{hm}$),并整体处于降温状态^[75],可能更有利于新元古界烃源岩的保存和持续生烃。

5 结 论

(1)中-新元古代两次超大陆裂解事件在华北、华南和塔里木克拉通边缘和内部形成规模巨大的中-新

元古代裂谷系。这些裂谷作为克拉通的最早期盆地,内部充填了巨厚的中-新元界,并为烃源岩发育提供有利场所。但是三大克拉通具有不同的裂谷发育时限和演化历史,其中华北克拉通以中元古代裂谷为主,华南与塔里木克拉通主要为新元古代裂谷。

(2)中-新元古代裂谷演化对早寒武世盆地的形成具有重要的控制,使得后者“向前相似”,而不是“向后相似”。在塔里木和扬子,早寒武世早期盆地与南华纪—震旦纪裂谷具有显著的继承性关系;在华北,青白口纪裂谷中心向东南缘移位则控制了早寒武世盆地的发育位置和海侵方向。

(3)三大克拉通中-新元古代裂谷的发育位置、发育规模和分布特征仍显示出动力学的多样性和多解性,因而在充填演化和勘探价值研究上也具有不同的观点和结论。目前除华南地区经深入研究已建立相应的裂谷成因相组合和等时对比格架外,塔里木和华北这方面的工作还很薄弱。因此应加强这两个地区中-新元古代裂谷层序的识别和充填模式的建立工作,特别是重点发现裂谷演化过程中某个阶段的烃源岩层序,并开展等时对比,在此基础上才能恢复该阶段的盆地原型,查明烃源岩分布规律。

致谢 研究工作得到了中国石油勘探开发研究院张水昌教授、靳久强教授和朱光有教授、中国石油勘探开发研究院廊坊分院魏国齐教授和杨威高级工程师、中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院杨海军教授和陈永全高级工程师以及北京大学侯贵廷教授的指导与帮助,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] ZIEGLER P A, CLOETINGH S. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 64(1/2): 1-50.
- [2] MANN P, GAHAGAN L, GORDON M B. Tectonic Setting of the world's giant oil and gas fields[M]// Halbouty M T. *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990-1999*. Tulsa, Okla: AAPG, 2003, 78: 15-105.
- [3] FRASER S I, FRASER A J, LENTINI M R, et al. Return to rifts—the next wave: fresh insights into the petroleum geology of global rift basins[J]. *Petroleum Geoscience*, 2007, 13(2): 99-104.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 乔秀夫,高林志,张传恒.中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J].地质通报,2007,26(5):503-509.
QIAO Xiufu,GAO Linzhi,ZHANG Chuanheng. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino-Korean plate[J]. Geological Bulletin of China,2007,26(5):503-509.
- [8] 李忠权,刘记,李应,等.四川盆地震旦系威远-安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J].石油勘探与开发,2015,42(1):26-33.
LI Zhongquan,LIU Ji,LI Ying,et al. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2015,42(1):26-33.
- [9] 魏国齐,杨威,杜金虎,等.四川盆地震旦纪-早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J].天然气工业,2015,35(1):24-35.
WEI Guoqi,YANG Wei,DU Jinhu,et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift,Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2015,35(1):24-35.
- [10] 邹才能,杜金虎,徐春春,等.四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J].石油勘探与开发,2014,41(3):278-293.
ZOU Caineng,DU Jinhu,XU Chunhui,et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field,Sichuan Basin,SW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2014,41(3):278-293.
- [11] ZHAI Mingguo. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent[J]. Science China: Earth Sciences,2013,56(11):1829-1852.
- [12] ZHANG Guowei,GUO Anlin,WANG Yuejun,et al. Tectonics of South China continent and its implications [J]. Science China: Earth Sciences,2013,56(11):1804-1828.
- [13] 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.
- [14] HOU Guiting,SANTOSH M,QIAN Xianglin,et al. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia; insights from radiating mafic dyke swarms [J]. Gondwana Research,2008,14(3):395-409.
- [15] 翟明国,胡波,彭澎,等.华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J].地学前缘,2014,21(1):100-119.
ZHAI Mingguo,HU Bo,PENG Peng,et al. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC [J]. Earth Science Frontiers,2014,21(1):100-119.
- [16] 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.
- [17] LI Zhengxiang,EVANS D A D,HALVERSON G P. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the break-up of Rodinia to the assembly of Gondwanaland [J]. Sedimentary Geology,2013,294:219-232.
- [18] ZHAI Mingguo,SANTOSH M. Metallogeny of the North China Craton; link with secular changes in the evolving Earth [J]. Gondwana Research,2013,24(1):275-297.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] HE Jiewen,ZHU Wenbin,GE Rongfeng. New age constraints on Neoproterozoic diamictites in Kuruktag, NW China and Precambrian crustal evolution of the Tarim Craton [J]. Precambrian Research,2014,241:44-60.
- [22] 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.
- [23] LI Xianhua,LI Zhengxiang,ZHOU Hanwei,et al. U-Pb zircon geochronology,geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China; implications for the initial rifting of Rodinia [J]. Precambrian Research,2002,113(1/2):135-154.
- [24] LAN Zhongwu,LI Xianhua,ZHU Maoyan,et al. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations [J]. Precambrian Research,2014,255:401-411.
- [25] 葛文春,李献华,李正祥,等.龙胜地区镁铁质侵入体:年龄及其地质意义 [J].地质科学,2001,36(1):112-118.
GE Wenchun,LI Xianhua,LI Zhengxiang,et al. Mafic intrusions in Longsheng area; age and its geological implications [J]. Chinese Journal of Geology,2001,36(1):112-118.
- [26] LI X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block; timing of Neoproterozoic Jinning orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly [J]. Precambrian Research,1999,97(1/2):43-57.
- [27] ZHANG Shuichang,WANG Xiaomei,HAMMARLUND E U,et al. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(12):E1406-E1413.
- [28] 苏文博,李怀坤,Huff W D,等.铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义 [J].科学通报,2010,55(22):2197-2206.
SU Wenbo,LI Huaikun,HUFF W D,et al. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation,North China [J]. Chinese Science Bulletin,2010,55(29):3312-3323.
- [29] 高林志,张传恒,刘鹏举,等.华北-江南地区中、新元古代地层格架的再认识 [J].地球学报,2009,30(4):433-446.
GAO Linzhi,ZHANG Chuanheng,LIU Pengju,et al. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China [J]. Acta Geoscientia Sinica,2009,30(4):433-446.
- [30] 孙会一,高林志,包创,等.河北宽城中元古代串岭沟组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J].地质学报,2013,87(4):591-596.
SUN Huiyi,GAO Linzhi,BAO Chuang,et al. SHRIMP zircon U-Pb of Mesoproterozoic Chuanlinggou Formation from Kuancheng county in Hebei province and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica,2013,87(4):591-596.
- [31] JIANG Neng,GUO Jinghui,ZHAI Mingguo. Nature and origin of the Wenquan granite; implications for the provenance of Proterozoic A-type granites in the North China craton [J]. Journal of Asian Earth Sciences,2011,42(1/2):76-82.
- [32] 谷志东,张维,袁苗.四川盆地威远地区基底花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J].地质科学,2014,49(1):202-213.

- GU Zhidong, ZHANG Wei, YUAN Miao. Zircon SHRIMP U-Pb dating of basal granite and its geological significance in Weiyuan area of Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(1): 202-213.
- [33] WANG Xuance, LI Xianhua, LI Wuxian, et al. The Bikou basalts in the northwestern Yangtze block, South China: remnants of 820-810 Ma continental flood basalts? [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(11/12): 1478-1492.
- [34] WANG Xuance, LI Xianhua, LI Wuxian, et al. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: first evidence for $>1500^{\circ}\text{C}$ mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. Geology, 2007, 35(12): 1103-1106.
- [35] 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.
- [36] 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: English Edition, 2010, 84(3): 549-562.
- [37] PENG Peng, BLEEKER W, ERNST R E, et al. U-Pb baddeleyite ages, distribution and geochemistry of 925 Ma mafic dykes and 900 Ma sills in the North China craton: evidence for a Neoproterozoic mantle plume[J]. Lithos, 2011, 127(1/2): 210-221.
- [38] WAN Bo, WINDLEY B F, XIAO Wenjiao, et al. Paleoproterozoic high-pressure metamorphism in the northern North China Craton and implications for the Nuna supercontinent[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8344.
- [39] 谷志东, 汪泽成. 四川盆地川中地块新元古代伸展构造的发现及其在天然气勘探中的意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2210-2220.
- GU Zhidong, WANG Zecheng. The discovery of Neoproterozoic extensional structures and its significance for gas exploration in the Central Sichuan Block, Sichuan Basin, South China[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(11): 2758-2768.
- [40] CORTI G, BONINI M, CONTICELLI S, et al. Analogue modelling of continental extension: a review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma [J]. Earth-Science Reviews, 2003, 63(3/4): 169-247.
- [41] OKUBO C H, MARTEL S J. Pit crater Formation on Kilauea volcano, Hawaii[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 86(1/4): 1-18.
- [42] 冯许魁, 刘永彬, 韩长伟, 等. 塔里木盆地震旦系裂谷发育特征及其对油气勘探的指导意义[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(2): 5-10.
- FENG Xukui, LIU Yongbin, HAN Changwei, et al. Sinian rift valley development characteristics in Tarim Basin and its guidance on hydrocarbon exploration[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(2): 5-10.
- [43] ZHAO Guochun, CAWOOD P A. Precambrian geology of China [J]. Precambrian Research, 2012, 222-223: 13-54.
- [44] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 上扬子地区新元古界含油气系统与油气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 27-36.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Hydrocarbon systems and exploration potentials of Neoproterozoic in the Upper Yangtze Region[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 27-36.
- [45] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 1-14.
- FENG Zengzhao, PENG Yongmin, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in south China[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 1-14.
- [46] 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.
- [47] GAO Jun, WANG Xinhui, KLEMD R, et al. Record of assembly and breakup of Rodinia in the Southwestern Altai: evidence from Neoproterozoic magmatism in the Chinese Western Tianshan Orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 173-193.
- [48] 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.
- [49] WANG Zhihong. Tectonic evolution of the western Kunlun orogenic belt, western China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24(2): 153-161.
- [50] 潘文庆, 陈永权, 熊益学, 等. 塔里木盆地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.
- [51] 周慧, 李伟, 张宝民, 等. 四川盆地震旦纪末期-寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 310-323.
- ZHOU Hui, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplateformal Basin in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 310-323.
- [52] 李伟, 刘静江, 邓胜徽, 等. 四川盆地及邻区震旦纪末-寒武纪早期构造运动性质与作用[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 546-556.
- LI Wei, LIU Jingjiang, DENG Shenghui, et al. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 546-556.
- [53] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 1-16.
- DU Jinhu, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the Formation of Anyue giant gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 1-16.
- [54] 何登发. 四川盆地及邻区原型盆地的形成、演化与油气分布关系研究[R]. 成都: 中国石油西南油田公司, 2012.
- HE Dengfa. Proto-type basins Formation, evolution and oil-gas distribution regularities in Sichuan Basin and its adjacent areas [R]. Chengdu: PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2012.
- [55] 吴因业, 刘伟, 刘艳, 等. 中国冈瓦纳的寒武系下伏沉积及其石油地质意义[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1069-1079.
- WU Yinye, LIU Wei, LIU Yan, et al. The underlying deposition of Cambrian of Gondwana in China and its petroleum geological significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1069-1079.
- [56] 于相青. 华北寒武纪二三世岩相古地理研究[D]. 泰安: 山东科技

- 大学,2012:1-77.
- YU Xiangqing. Study on second and third series of Cambrian lithofacies palaeogeography in North China[D]. Tai'an: Shandong University of Science and Technology, 2012:1-77.
- [57] 钟焱,赵亮东,陈留勤,等. 对华北中元古代海侵初期“河流相”沉积的重新认识:以天津蓟县剖面为例[J]. 古地理学报,2011,13(1): 21-29.
- ZHONG Yan, ZHAO Liangdong, CHEN Liuqin, et al. New understanding of “fluvial facies” deposition of the early transgression period of Mesoproterozoic: an example from Jixian section in Tianjin[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 21-29.
- [58] 周洪瑞,王自强. 华北大陆南缘中、新元古代大陆边缘性质及构造古地理演化[J]. 现代地质,1999,13(3): 261-267.
- ZHOU Hongrui, WANG Ziqiang. Feature and tectono-paleogeography evolution of the southern margin of the north China continent in Mesoproterozoic and Neoproterozoic era[J]. Geoscience, 1999, 13(3): 261-267.
- [59] 魏国齐,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地高石梯-磨溪地区震旦系-寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. 石油学报,2015,36(1): 1-12.
- WEI Guoqi, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 1-12.
- [60] 苏文博,李怀坤,徐莉,等. 华北克拉通南缘洛峪群-汝阳群属于中元古界长城系——河南汝州洛峪口组层凝灰岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的直接约束[J]. 地质调查与研究,2012,35(2): 96-108.
- SU Wenbo, LI Huaikun, XU Li, et al. Luoyu and Ruyang group at the south margin of the North China Craton (NCC) should belong in the Mesoproterozoic Changchengian system: direct constraints from the LA-MC-ICPMS U-Pb age of the Tuffite in the Luoyukou Formation, Ruzhou, Henan, China[J]. Geological Survey and Research, 2012, 35(2): 96-108.
- [61] BAO Zhidong, CHEN Jianfa, ZHANG Shuichang, et al. Sedimentary environment and development controls of the hydrocarbon source beds: middle and Upper Proterozoic in northern North China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(S2): 133-140.
- [62] 牛露,朱如凯,王莉森,等. 华北地区北部中-上元古界泥页岩储层特征及页岩气资源潜力[J]. 石油学报,2015,36(6): 664-672.
- NIU Lu, ZHU Rukai, WANG Lisen, et al. Characteristics and evaluation of the Meso-Neoproterozoic shale gas reservoir in the northern North China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 664-672.
- [63] ZHUO Jiewen, JIANG Xinsheng, WANG Jian, et al. Opening time and filling pattern of the Neoproterozoic Kangdian Rift Basin, western Yangtze Continent, South China[J]. Science China: Earth Science, 2013, 56(10): 1664-1676.
- [64] ZHOU Chuanming, TUCKER R, XIAO Shuhai, et al. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China[J]. Geology, 2004, 32(5): 437-440.
- [65] 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[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.
- [66] 曲永强,孟庆任,马收先,等. 华北地块北缘中元古界几个重要不整合面的地质特征及构造意义[J]. 地质前缘,2010,17(4): 112-127.
- QU Yongqiang, MENG Qingren, MA Shouxian, et al. Geological characteristics of unconformities in Mesoproterozoic successions in the northern margin of North China Block and their tectonic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 112-127.
- [67] 范宏瑞,胡芳芳,陈福坤,等. 白云鄂博超大型 REE-Nb-Fe 矿区碳酸岩墙的侵入年龄-兼答 Le Bas 博士的质疑[J]. 岩石学报,2006,22(2): 519-520.
- FAN Hongrui, HU Fangfang, CHEN Fukun, et al. Intrusive age of No. 1 carbonatite dyke from Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia: with answers to comment of Dr. Le Bas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2): 519-520.
- [68] 牛绍武,辛后田. 青白口系的区域对比与金州系的建立[J]. 地质调查与研究,2013,36(1): 1-9.
- NIU Shaowu, XIN Houtian. Stratigraphical correlation of the Qingbaikou system and establish of the Jinzhou system[J]. Geological Survey and Research, 2013, 36(1): 1-9.
- [69] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质,2010,29(1): 24-36.
- ZHAI Mingguo. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 24-36.
- [70] WU F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233: 103-119.
- [71] 朱日祥,陈凌,吴福元,等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学:地球科学,2011,41: 583-592.
- ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 54: 789-797.
- [72] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报,2012,31(7): 1035-1053.
- SHU Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [73] 任战利,张盛,高胜利,等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学:地球科学,2007,37(增刊 I): 23-32.
- REN Zhanli, ZHANG Shen, GAO Shengli, et al. Tectonic thermal evolution history and the metallogenic significance of Ordos Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2007, 37 (supplement I): 23-32.
- [74] 何登发,管树巍,张水昌,等. 上扬子克拉通北部晚古生代-中三叠世大陆边缘盆地的形成与演化[J]. 地质科学,2016,51(2): 329-353.
- HE Dengfa, GUAN Shuwei, ZHANG Shuichang. Formation and evolution of Later Paleozoic-Middle Triassic passive continental margin basin in the north part of Upper Yangtze Craton[J]. Chinese Journal of Geology, 2016, 51(2): 329-353.
- [75] 李慧莉,邱楠生,金之钧,等. 塔里木盆地的热史[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5): 613-617.
- LI Huili, QIU Nansheng, JIN Zhijun, et al. Geothermal history of Tarim basin[J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26(5): 613-617.

(收稿日期 2016-08-04 改回日期 2016-11-09 编辑 宋 宁)