

中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义

沈安江^{1,2}, 陈娅娜^{1,3}, 张建勇^{1,3}, 倪新锋^{1,2}, 周进高^{1,2}, 吴兴宁^{1,2}

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团公司 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023;
3. 中国石油 勘探开发研究院 四川盆地中心, 四川 成都 610094)

摘要: 台内碳酸盐岩是继台缘礁滩后值得关注的潜在勘探领域。基于露头、岩心、薄片观察及单井、地震、测试分析等资料, 解剖四川盆地德阳-安岳晚震旦世一早寒武世台内裂陷石油地质特征及成因, 类比塔里木盆地南华纪、鄂尔多斯盆地长城纪台内裂陷。结果表明: 罗迪尼亚泛大陆裂解为德阳-安岳台内裂陷的发育提供了区域地质背景, 张性或走滑断裂、差异沉降作用是台内裂陷形成的关键; 德阳-安岳台内裂陷经历了灯二段侵蚀发育期—灯四段裂陷发育期—麦地坪组—沧浪铺组裂陷鼎盛—充填期—龙王庙组缓坡台地发育期的演化过程, 其控制了筇竹寺组、麦地坪组两套烃源岩和灯四段、龙王庙组两套储集层的发育; 烃源岩和储集层的空间配置构成“侧生侧储”和“下生上储”两类成藏组合; 塔里木盆地南华纪、鄂尔多斯盆地长城纪台内裂陷与德阳-安岳台内裂陷具相似的地质特征, 勘探潜力值得期待。上述认识使勘探领域由台缘拓展到台内, 对中国古老小克拉通台地海相碳酸盐岩油气勘探具指导意义。

关键词: 海相碳酸盐岩; 台内裂陷; 震旦纪; 寒武纪; 长城纪; 四川盆地; 塔里木盆地; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Characteristics of intra-platform rift in ancient small-scale cratonic platform of China and its implications for hydrocarbon exploration

Shen Anjiang^{1,2}, Chen Yana^{1,3}, Zhang Jianyong^{1,3}, Ni Xinfeng^{1,2}, Zhou Jingao^{1,2}, Wu Xingning^{1,2}

[1. Hangzhou Research Institute of Geology (HIPG), PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Research Center of Sichuan Basin, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610094, China]

Abstract: The intra-platform carbonate rock is another potential for hydrocarbon exploration in addition to reef-shoal at the platform margins. The study focuses on the elucidation of petroleum geologic characteristics and origin of intra-platform rifts in the Deyang-Anyue area during the Upper Sinian-Lower Cambrian, Sichuan Basin, and analysis of analogues of the intra-platform rifts such as the Tarim Basin during the Nanhua Period and the Ordos Basin during the Changcheng Period, based on the outcrop, core, and thin section observation, as well as single-well, seismic and testing data. The results show that (1) the breakup of Rodinia Pangaea provides the regional geological setting for the development of Deyang-Anyue intra-platform rifts. Tensional or strike-slipping faulting and differential subsidence are key to the formation of intra-platform rifts; (2) The Deyang-Anyue intra-platform rifts have gone through four stages of evolution, namely, the erosional stage during the deposition of the 2nd member of Dengying Formation, the rifting stage during the 4th member of Dengying Formation, the rifting climax-filling stage during the Maidiping - Canglangpu Formations, and the development of ramp-platform during the deposition of Longwangmiao Formation. In turn, the rift controlled the development of two sets of source rocks (Qiongzhusi and Maidiping Formations) and two reservoirs (the 4th member of Dengying Formation and Longwangmiao Formation); (3) Two types of hydrocarbon accumulation assemblages formed according to the spatial configuration of source rocks and reservoirs, with reservoir either alongside the source rock on the same depth level or above it; (4) The intra-platform rifts in the Tarim Basin during Nanhua Period and in the Ordos Basin during Changcheng Period share similar geological features with those in Deyang-Anyue area, indicating good hydrocarbon exploration potential.

收稿日期: 2019-03-17; 修订日期: 2019-10-09。

第一作者简介: 沈安江(1965—), 男, 博士、教授、博士生导师, 碳酸盐岩沉积储层。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 陈娅娜(1975—), 女, 博士、高级工程师, 油气勘探地质。E-mail: chenyn_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05004-002); 中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目(2018D-5008-03); 中国石油科技重大专项(2018A-0103)。

These results suggest that the region of hydrocarbon exploration can be extended from platform margin to intra-platform. This may shed a guiding light to the hydrocarbon exploration of marine carbonate reservoirs in ancient small-scale cratonic platforms in China.

Key words: marine carbonate rock, intra-platform rift, Sinian, Cambrian, Changcheng Period, Sichuan Basin, Tarim Basin, Ordos Basin

过去数十年,因台缘带比台内具有更优越的石油地质条件,碳酸盐岩油气勘探主要集中在台缘带,但中国古老小克拉通台地的台缘带大多被俯冲构造山带之下,埋藏深,构造复杂,勘探难度大,碳酸盐台地台内勘探潜力评价成为关键。近十年,随着四川盆地开江-梁平二叠纪-三叠纪台内裂陷、德阳-安岳晚震旦世-早寒武世台内裂陷勘探的相继突破及普光、安岳等大气田的发现,地质家们看到了台内裂陷地质背景下碳酸盐台地油气勘探的巨大潜力,但在台内裂陷命名、成因、演化和控藏等方面的认识仍存分歧^[1-5]。本文从台内裂陷特征、成因、演化及对生储组合的控制入手,重点解剖四川盆地德阳-安岳晚震旦世-早寒武世台内裂陷的石油地质意义,类比塔里木盆地南华纪、鄂尔多斯盆地长城纪台内裂陷,以期对中国古老小克拉通台地海相碳酸盐岩台内油气勘探具借鉴作用。

1 台内裂陷特征、成因及识别

1.1 台内裂陷定义及地质特征

关于裂陷的术语和分类仍存在较大的分歧,笔者罗列几个容易混淆的常用术语加以阐述(表 1)^[6-9]。

泛大陆裂解为台内裂陷的发育提供了区域地质背景^[10],鄂尔多斯盆地长城纪台内裂陷的发育与哥伦比亚(Columbia)超大陆的裂解有关^[11],四川盆地震旦

纪-早寒武世德阳-安岳台内裂陷和塔里木盆地南华纪库满台内裂陷的发育与罗迪尼亚(Rodinia)超大陆的裂解有关^[12-13],南盘地区泥盆纪-石炭纪台内裂陷的发育与冈瓦纳(Gondwana)大陆的裂解有关^[14],四川盆地二叠纪-三叠纪开江-梁平台内裂陷的发育与潘基亚(Pangea)大陆的裂解有关^[15],这正是中国南方、华北及三大海相克拉通盆地台内裂陷主要发育于上述层位的主要原因(图 1)。

1.2 四川盆地德阳-安岳台内裂陷成因

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发育起来的叠合盆地,基底是晋宁运动形成的褶皱基底^[16]。受劳亚超大陆裂解影响,扬子古大陆发生兴凯地裂运动,形成一系列新元古代裂谷盆地,主裂谷盆地南华裂谷与康滇裂谷分别位于扬子地块的东南缘与西缘^[17]。震旦纪区域性大陆裂谷作用结束,进入克拉通内裂陷演化阶段^[18]。全球板块重建和扬子板块恢复均揭示中、上扬子板块在震旦纪-寒武纪仍处于拉张构造环境,兴凯地裂运动不仅使中国地台解体形成秦岭-天山等洋盆,而且在大陆板块边缘形成中新元古代至早古生代的拗拉谷。王剑等研究扬子板块震旦纪盆地原型时,也提出中、上扬子板块存在克拉通内裂陷的观点^[19-20],罗迪尼亚(Rodinia)泛大陆裂解为德阳-安岳台内裂陷的发育提供了区域地质背景。

表 1 裂陷类型、规模、成因机理及地质特征
Table 1 Types, scale, origin and geological characteristics of rifts

构造	定义	规模和形态	成因机理	地质特征
大陆裂谷	以高角度断层为界呈长条带的地壳下降区,包括主动裂谷和被动裂谷	深数千至万米,宽数十至数百千米,长数百至数千千米	大陆裂解(地幔柱上拱、热点)、伸展或剪切作用	位于大陆板块内部,最终演化为大洋,基底为洋壳和过渡壳。具有双峰式火山岩+类磨拉石+复理石建造;经历地堑、洋盆、消减或碰撞 3 个演化阶段
拗拉谷	拉张环境下形成的狭长沉陷带,通常认为是三叉裂谷系夭折的一支	深数千至万米,宽数十至数百千米,长数百至千米	夭折的三叉裂谷、裂谷扩张轴迁移、走滑断裂	位于板块边缘,基底为洋壳和过渡壳。具有双峰式火山岩+类磨拉石+复理石建造;经历地堑、凹陷、造山或褶皱回返 3 个演化阶段
台内裂陷	碳酸盐台地内由张性或剪切边界断裂、差异沉降作用形成的带状沉陷区	深数百至千米,宽数十至百千米,长百至数百千米	断裂拉张或走滑拉分作用、裂谷或拗拉槽插入台地的部分	位于碳酸盐台地内,基底为陆壳。台盆/陆棚+浅海沉积碳酸盐岩和碎屑岩建造;经历裂陷、凹陷、填平补齐 3 个演化阶段
拗陷	地壳上不同成因的下降构造单元	无尺度大小和形态的限制	同生断裂、古地貌低	位于碳酸盐台地内,不规则状(等轴或长轴);基底为陆壳,浅海碳酸盐岩夹泥质岩;经历凹陷、填平补齐 2 个演化阶段

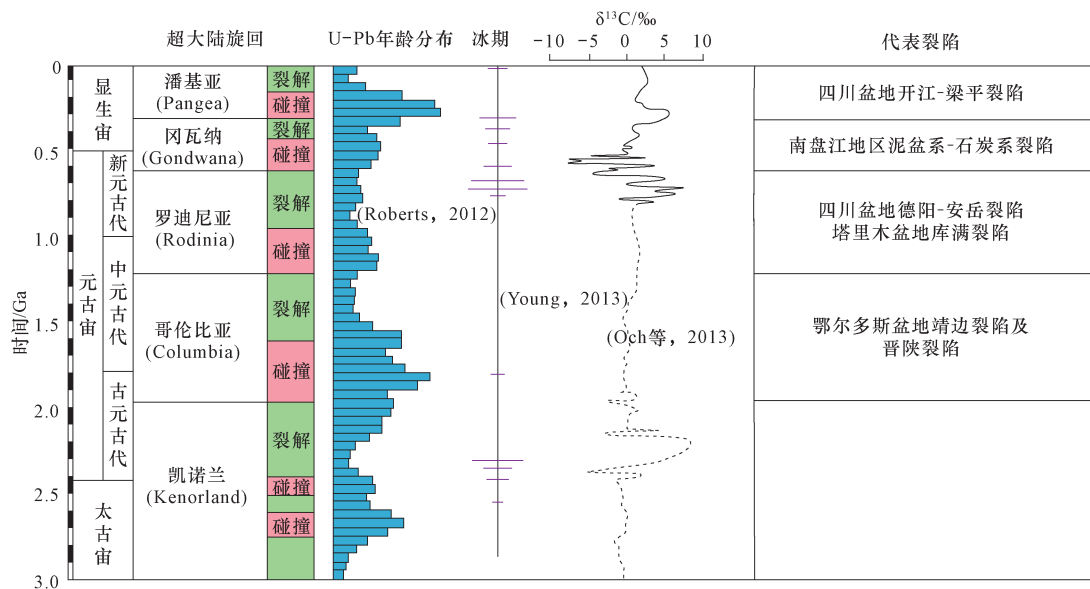


图 1 全球超大陆裂解与台内裂陷发育的耦合关系(据文献[10-15]修编)

Fig. 1 The coupling between the global supercontinent breakup and the development of intra-platform rift (modified after references[10-15])

张性或走滑断裂、差异沉降作用是台内裂陷形成的关键。地震剖面揭示,德阳-安岳台内裂陷分布受断裂控制,裂陷内部及两侧发育张性断层,表现为断陷特征。边界断层断距大,从北向南断距有变小趋势。纵向上,震旦系及下寒武统筇竹寺组断距最大,具同沉积断层特征,灯影组四段(灯四段)底界断距在 400 ~ 500 m,寒武系底界断距在 300 ~ 400 m,沧浪铺组断距减小甚至消失,除边界断层外的多数断层消失在龙王庙组。上述特征表明断层在晚震旦世灯影组沉积期就已经开始活动,从北西向南东、从盆地边缘向盆地内部有不断减弱的趋势。

2 四川盆地晚震旦世一早寒武世台内裂陷解剖

德阳-安岳晚震旦世一早寒武世台内裂陷位于四川盆地腹部,由川西向川中至蜀南呈北西西向延伸,宽度 30 ~ 100 km,南北延伸长度达 300 km 以上,在盆地范围内面积达 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文重点阐述台内裂陷特征和演化,探索其形成机理。

2.1 台内裂陷特征、演化及形成机理

2.1.1 台内裂陷的识别特征与分布

台内裂陷和台地具明显不同的地层厚度与沉积相序(图 2)。德阳-安岳地区灯一段-灯二段厚度明显比两侧薄(图 2a),但岩相特征一致,均为浅水碳酸盐

台地沉积,可能代表灯二段沉积后沿德阳-安岳台内裂陷的一次走滑隆升和剥蚀侵蚀作用,与桐湾运动 I 幕及灯二沉积期末的侵蚀作用有关,剥蚀侵蚀高差 200 ~ 300 m。台内裂陷灯四段厚度明显薄于同期裂陷周缘和台内地层厚度,裂陷内为较深水沉积,岩性主要为瘤状泥质泥晶白云岩和暗色泥质泥晶白云岩,裂陷周缘与台内为浅水碳酸盐台地沉积(图 2b),说明此时发生了一次强拉张作用,张性或走滑断裂导致德阳-安岳负向构造单元的形成。灯四段沉积后碳酸盐台地再次暴露(桐湾运动 II 幕)并遭受侵蚀,台内裂陷演化为残留海盆,随后的麦地坪组主要分布在裂陷内,水体明显变浅,出现浅水碳酸盐岩夹层,裂陷内地层厚度明显大于同期裂陷周缘和台内地层厚度(图 2c),进入填平补齐的沉积阶段。筇竹寺组沉积期第二次拉张,随后扬子克拉通台地被淹没,发育了一套广泛分布的泥质烃源岩。进入沧浪铺组和龙王庙组沉积期,裂陷消亡,进入缓坡碳酸盐台地演化阶段,地层厚度和水体深度无论在裂陷内还是台地相区,均没有明显的变化(图 2d)。

德阳-安岳台内裂陷拉张成因证据还有以下 4 点:①灯四段沉积期台内裂陷与台地过渡带具明显的台缘带及分界断裂,裂陷区张性及走滑断层活动明显,其中规模较大的磨溪-高石梯西侧断层长达 300 km,向北延伸至川西海盆,是控制裂陷形成的边界断层;②李双建等^[21]最新研究表明,灯四段硅质岩正 Eu 异常,指示其沉积与拉张作用的边界断裂有关;③韩雨樾等^[22]在盆地北缘的下寒武统筇竹寺组黑色页岩中检

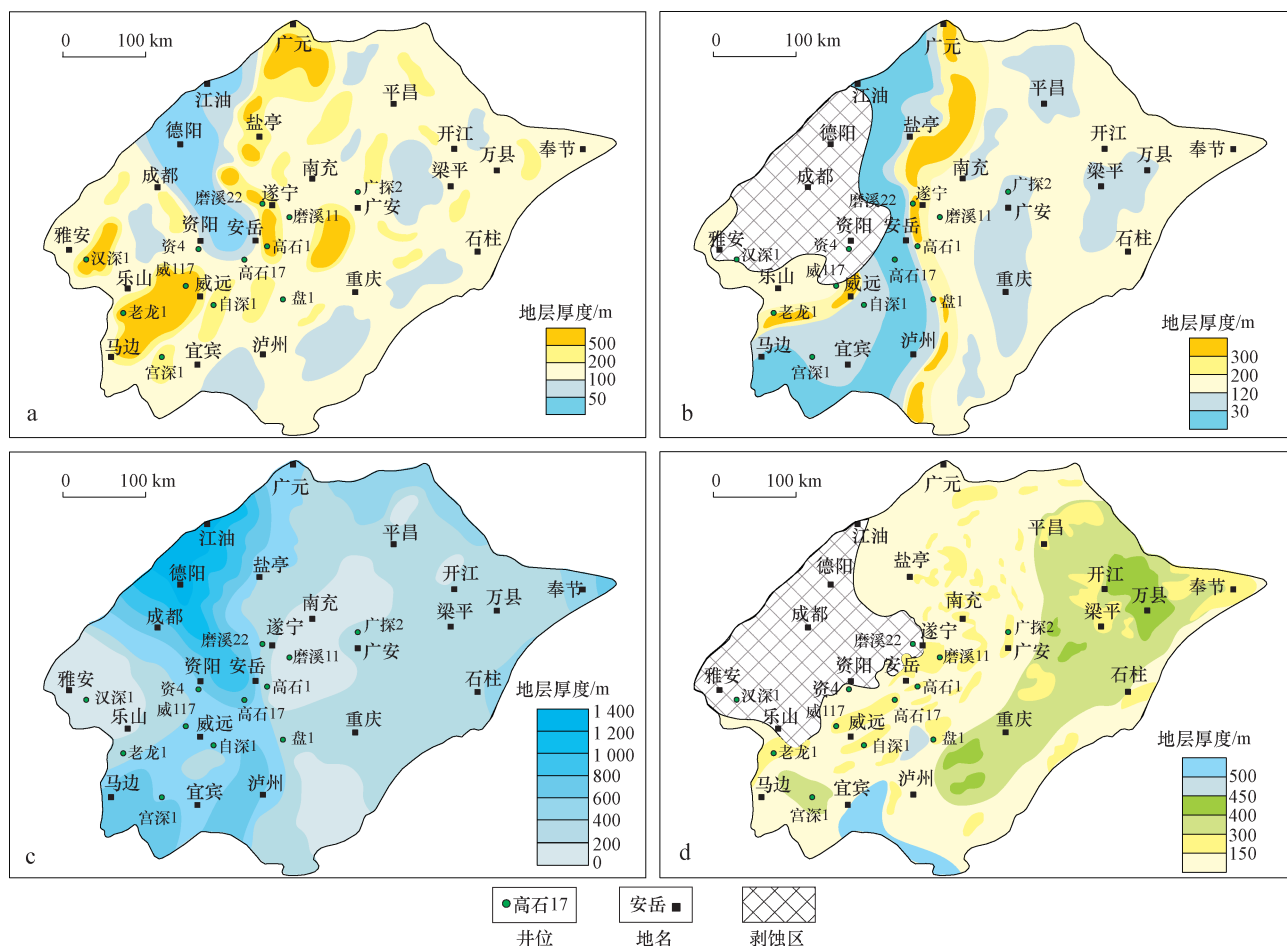


图2 四川盆地灯影组—龙王庙组地层厚度

Fig. 2 The stratigraphic isopach map of the Dengying and Longwangmiao Formations, Sichuan Basin

a. 灯一段—灯三段; b. 灯四段; c. 麦地坪组—筇竹寺组; d. 沧浪铺组—龙王庙组

测出4-甲基甾烷为典型热液喷口微生物的分子化石,其产出为德阳—安岳台内裂陷的拉张成因提供了又一证据;④裂陷周缘发育多期丘滩体,呈进积式叠置,而灯二段无明显的生物建隆特征,向沟槽方向急剧“下切”。

最初的研究认为灯四段沉积期台内裂陷主要分布于德阳—安岳一带,而最新研究揭示该裂陷向南可以延伸到蜀南地区,新增台缘带 3 000 km² (图3)。蜀南地区与德阳—安岳地区地层厚度变化特征相似(图2),沿老龙1井—川龙1井—YS102井—阳1井的连井剖面与北侧的资4井—高石17井—高石1井的连井剖面具相似的地层厚度和沉积相序变化特征,其次,位于德阳—安岳裂陷内的高石17井与位于蜀南地区的YS102井具相似的地层厚度和沉积相序,证实蜀南地区台内裂陷的存在。

2.1.2 台内裂陷的演化

德阳—安岳台内裂陷是受张性或走滑断裂控制的负向构造单元^[23],其演化从灯二段沉积末期的隆升剥

蚀开始,侵蚀作用主要发生在灯二段沉积期末,形成的负向构造单元为灯三段沉积期的初始海侵提供了通道。灯四段沉积期的张性或走滑断裂活动使德阳—安岳地区发生强烈沉降,形成沿断裂带分布的台内裂陷。灯四段—筇竹寺组沉积期为台内裂陷发育鼎盛期,沧浪铺组沉积期进入填平补齐阶段,台内裂陷消亡,龙王庙组沉积期进入缓坡台地发育阶段(图4),整个演化史可进一步细分为以下10个阶段。

1) 灯一段—灯二段沉积期(图4a),为克拉通浅水台地发育阶段,江油一带发育台内裂陷雏形。

2) 灯二段沉积末期(图4b),受桐湾运动I幕影响,克拉通台地抬升遭受剥蚀。

3) 灯二段沉积期末(图4c),德阳—安岳地区受深切侵蚀,地层变薄,进入侵蚀发育期。

4) 灯三段沉积期(图4d),德阳—安岳地区灯二段沉积期末形成的负向构造单元为初始海侵提供了通道,早期以沼泽相黑色泥岩、砂质泥岩、含砾砂岩为主,晚期相变为泥晶白云岩和颗粒白云岩。

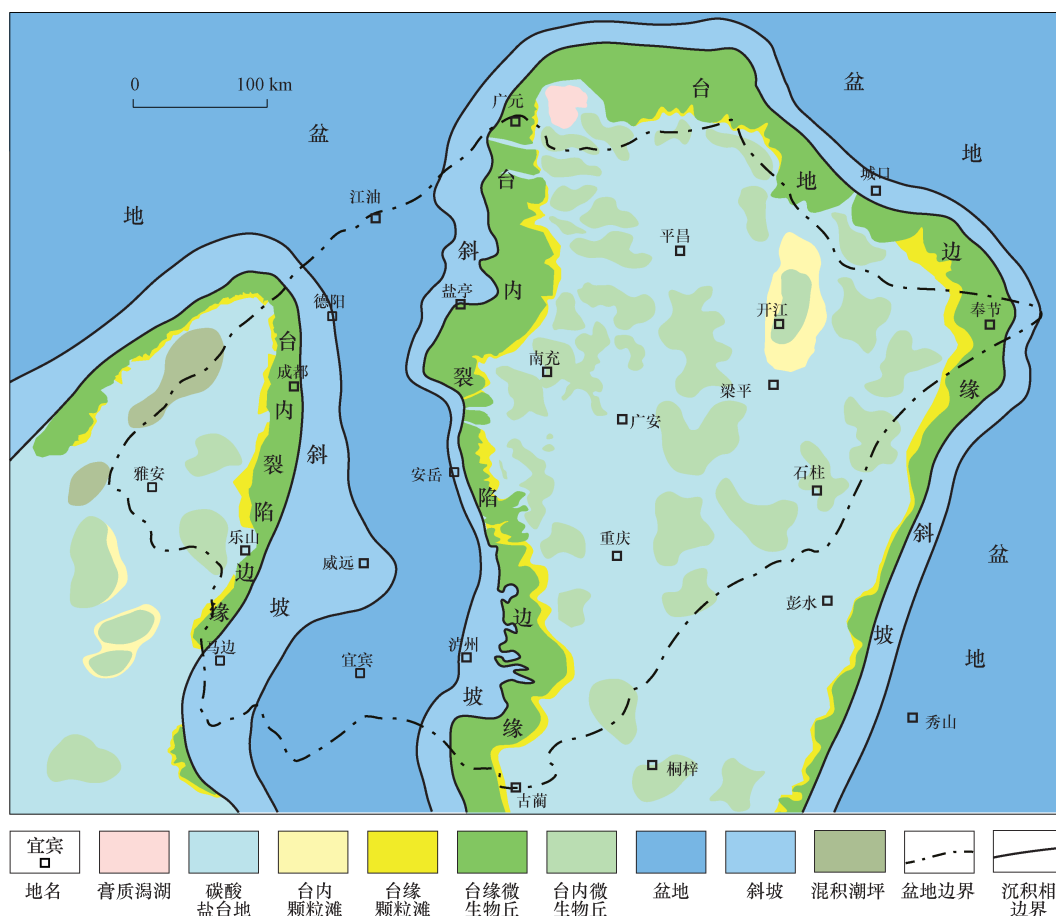


图3 四川盆地灯四段沉积期台内裂陷及烃源岩、储层分布

Fig. 3 The distribution of intra-platform rifts, source rocks, and reservoirs, Sichuan Basin

5) 灯四段沉积期(图4e),第一次强拉张,进入台内裂陷发育期,沿先期的负向构造单元呈继承性发育。区域上,中、上扬子板块主体灯三段沉积期发育碳酸盐岩-碎屑岩混积沉积,灯四段沉积期发育浅水碳酸盐台地,面积达 $75 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉积厚逾千米。受区域拉张作用影响,上扬子克拉通西北边缘发育从川西海盆向克拉通盆地腹部延伸并与湘桂海盆沟通的克拉通内裂陷,即德阳-安岳台内裂陷,是张性或走滑断裂活动使德阳-安岳地区发生强烈沉降的产物。裂陷内的灯四段为深水沉积,裂陷周缘发育多期丘滩体,呈进积式叠置。

6) 灯四段沉积期末(图4f),受桐湾运动Ⅱ幕影响,海水退出,灯影组抬升遭受剥蚀,裂陷内进一步受到侵蚀。

7) 早寒武世梅树村组沉积期(图4g),受区域拉张作用影响,克拉通内裂陷边界断层再度活动,海水淹没,麦地坪组底部沉积炭质页岩含火山灰夹层,晚期海水变浅,沉积胶磷矿,麦地坪组沉积期末,受桐湾运动Ⅲ幕影响,盆地中部裂陷海水退出,遭受侵蚀,西北部地层发育较全。

8) 筇竹寺组沉积期(图4h),第二次强拉张,再次

大规模海侵,碳酸盐台地被淹没,扬子地区普遍发育陆棚相碎屑岩,也是扬子克拉通主要的烃源岩发育期。该时期克拉通台内裂陷及邻区区域性张裂活动强烈,正断层普遍发育。裂陷区构造活动具早断、晚拗特征,沉积响应表现为早期发育断陷深水陆棚相深灰色含硅磷页岩、泥岩,中、晚期逐渐过渡到浅水陆棚相砂质泥岩。平面上,裂陷区向西过渡为三角洲沉积细砂岩,向东过渡为浅水陆棚相泥质岩。

9) 沧浪铺组沉积期(图4i),裂陷消亡。早寒武世中、晚期是中、上扬子克拉通构造转换的重要时期,由构造拉张向挤压转换。受其影响,上扬子克拉通西缘开始形成古陆,如康滇、汉南古陆,成为陆源碎屑沉积的物源区,在四川盆地西南缘可见滨岸三角洲相沉积。高石17井与磨溪-高石梯地区钻井对比表明,沧浪铺组中部普遍发育厚30~40 m的灰岩段,电性特征明显,分布稳定,可对比性强,表明沧浪铺组沉积期台内裂陷已消亡,进入克拉通拗陷演化阶段。

10) 龙王庙组沉积期(图4j),进入缓坡台地演化阶段,沉积格局已经发生巨大转变,德阳-安岳台内裂陷已不存在,为西高东低的碳酸盐岩缓坡取代。

2.2 台内裂陷的石油地质意义

克拉通台地台内裂陷的发现、台内裂陷鼎盛期“两类台缘”和缓坡台地期“双滩”沉积模式的建立,揭示了台内同样发育烃源岩和规模储集层,构成“侧生侧储”和“下生上储”两类成藏组合,为勘探领域由台缘拓展到台内提供了理论依据。

2.2.1 台内裂陷演化对生烃中心的控制

据杜金虎等^[23]研究,四川盆地震旦系-寒武系发育两套主力烃源岩,分别为筇竹寺组和麦地坪组黑色、灰黑色泥页岩。麦地坪组烃源岩位于台内裂陷中,筇竹寺组烃源岩与台内裂陷演化过程中的台地被淹没有关,虽然在中、上扬子区广布,但在台内裂陷中烃源岩厚度明显大于台地。

筇竹寺组烃源岩主要为黑色-灰黑色泥页岩和炭质泥岩,有机质丰度较高,有机碳含量(*TOC*) 在 0.50%~8.49%,平均为 1.95%。分布明显受台内裂陷控制,沿裂陷方向烃源岩厚度最大,一般在 300~350 m,如裂陷内部的高石 17 井烃源岩厚度超过 200 m,北部天 1 井区厚度超过 350 m,蜀南地区最大厚度超过 450 m。裂陷两侧烃源岩厚度明显减薄,西侧威远-资阳地区厚度在 100~300 m,向西快速减薄至 50~100 m。东侧高石梯-磨溪地区厚度一般在 120~200 m。裂陷主体部位筇竹寺组烃源岩厚度是邻区的 2~5 倍。

麦地坪组烃源岩主要为硅质页岩和炭质泥岩等,有机质丰度较高,*TOC* 含量在 0.52%~4.00%,平均为 1.68%。麦地坪组烃源岩主要分布在裂陷内,厚度在 50~100 m,而周缘地区仅 1~5 m,两者相差 10 倍以上。

生烃演化和气源对比揭示^[23],四川盆地筇竹寺组和麦地坪组两套主力烃源岩总生油量为 $18\,129 \times 10^8$ t,高石梯-磨溪构造天然气藏的气源主要来自裂陷内筇竹寺组和麦地坪组两套主力烃源岩。

2.2.2 台内裂陷演化对规模储集层的控制

台内裂陷的演化控制了两套规模优质储集层的发育,一是灯四段与台内裂陷发育鼎盛期相关的裂陷周缘丘滩白云岩储集层,二是龙王庙组与台内裂陷演化末期填平补齐相关的缓坡台地颗粒滩白云岩储集层。

灯四段丘滩白云岩储集层厚 60~180 m,分布面积为 5×10^4 km²,孔隙度在 3.8%~6.9%^[24]。储集层岩性主要有藻纹层、藻叠层、藻格架白云岩以及少量藻泥晶和颗粒白云岩(藻屑和砂屑白云岩)。储集空间类型主要有格架孔(0.01~2 mm)和溶蚀孔洞(2~100 mm),少

量裂缝和溶洞(100 mm~50 cm)。裂缝和溶蚀孔洞是高产的重要控制因素。储集层发育受控于 2 个因素:①丘滩体是储集层发育的基础,也是沉积原生孔的载体;②频繁和持续的准同生溶蚀形成的溶蚀孔洞是储集层发育的关键,优质储集层分布于向上变浅旋回的上部,与海平面下降和丘滩体暴露有关。埋藏-热液活动对储集层的改造主要表现在通过热液矿物的充填封堵孔隙,而不是新增孔隙。优质规模储集层主要分布在台内裂陷周缘,具物性好、厚度大的特点,台内丘滩白云岩储集层物性较差,厚度较薄。

龙王庙组储集层岩性主要有砂屑白云岩和粉-细晶白云岩,少量鲕粒白云岩和中-粗晶白云岩,储集空间类型主要有粒间孔、晶间(溶)孔和溶蚀孔洞,晶间孔是对原岩孔隙的继承和调整,溶蚀孔洞与埋藏-热液溶蚀作用有关,而非表生溶蚀的结果,裂缝和溶蚀孔洞是高产的主控因素。储集层发育受控于 3 个因素:①颗粒滩沉积是储集层发育的基础,也是沉积原生孔的载体;②频繁和持续的准同生溶蚀形成的溶蚀孔洞是储集层发育的关键,优质储集层分布于向上变浅旋回的上部,与海平面下降和丘滩体暴露有关;③埋藏溶蚀作用形成的非组构选择性溶蚀孔洞对龙王庙组储集空间有重要贡献。储集层呈层状大面积分布于缓坡台地上,厚 20~60 m,孔隙度为 3.5%~8.0%^[25]。

据此,建立了台内裂陷鼎盛期“两类台缘”和缓坡台地期“双滩”沉积模式(图 5),指出台内裂陷的发育和演化造就了台内两套规模储集层的发育。

2.2.3 台内裂陷背景下的成藏组合

四川盆地震旦系-下寒武统德阳-安岳台内裂陷的演化控制两套主力烃源岩和两套规模优质储集层的发育与分布,并由此构成两套主力成藏组合(图 6),断层是油气运移的重要通道^[23]。

1) 灯四段丘滩白云岩储集层气藏

台内裂陷周缘灯四段丘滩白云岩储集层,主力气源来自裂陷内的筇竹寺组和麦地坪组烃源岩,构成“旁生侧储、上生下储”式生储组合,披盖在储集层顶部的筇竹寺组烃源岩,既为下覆储集层提供烃源,又兼作盖层。台内灯四段丘滩白云岩储集层与上覆筇竹寺组烃源岩构成“上生下储”式生储组合,筇竹寺组烃源岩兼作盖层,但成藏规模远不如台内裂陷周缘。

2) 龙王庙组颗粒滩白云岩储集层气藏

龙王庙组颗粒滩白云岩储集层在缓坡台地上呈层状分布于浅水内缓坡和中缓坡,与下覆筇竹寺组和麦地坪组烃源岩构成“下生上储”式生储组合,断层构成

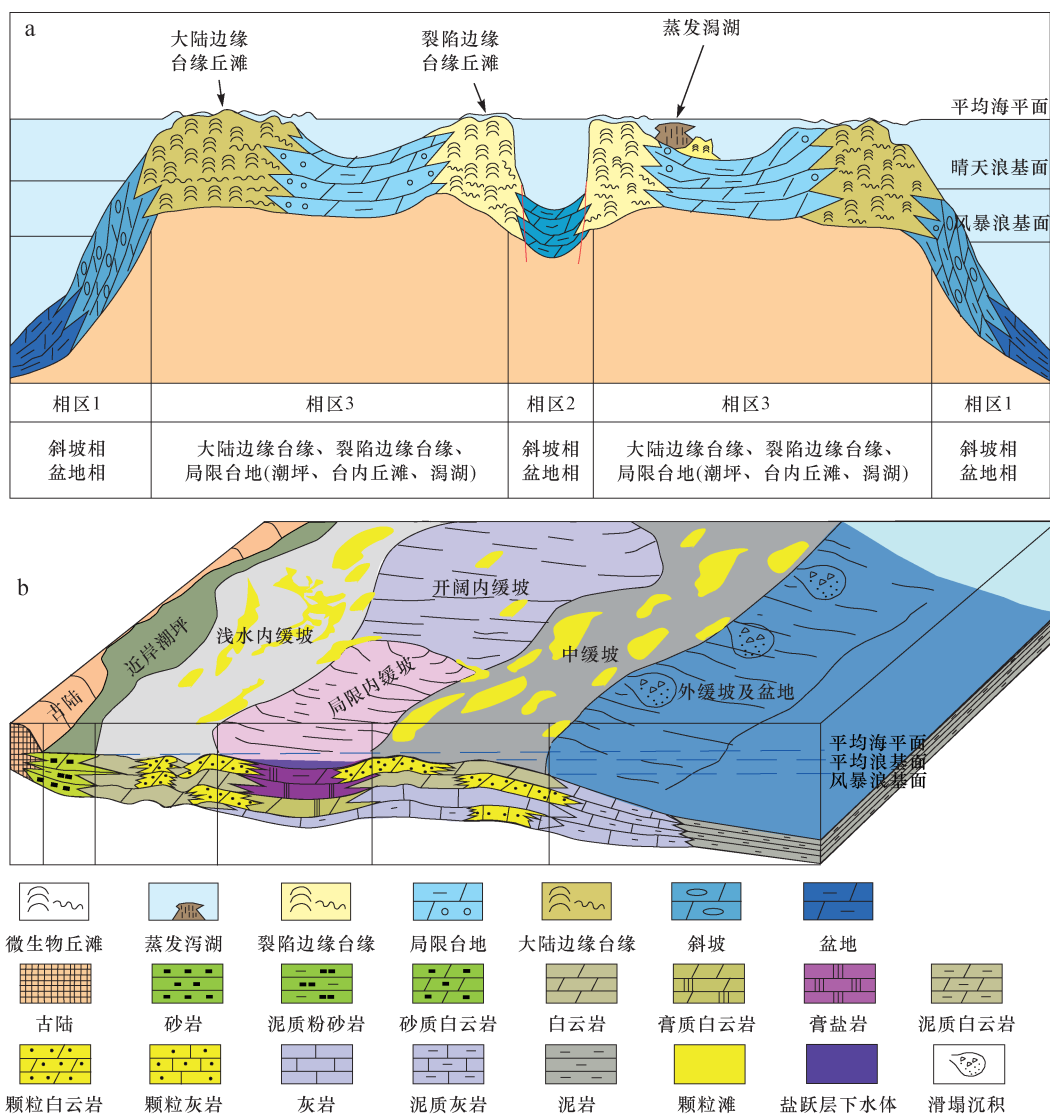


图5 四川盆地灯影组与龙王庙组沉积模式

Fig. 5 The sedimentary patterns of the Dengying and Longwangmiao Formations, Sichuan Basin

a. 灯四段台内裂陷鼎盛期“两类台缘”沉积模式; b. 龙王庙组上段碳酸盐缓坡期“双滩”沉积模式

油气运移的通道,中-上寒武统构成直接盖层,剥蚀强烈的地区,奥陶系、二叠系等构成间接盖层。

高石梯-磨溪地区台内裂陷勘探实践揭示,除台缘带外,具有台内裂陷发育地质背景的台内同样具有很好的勘探潜力,同样可以发现大油气田,这对中国古老海相小克拉通台地油气勘探具有重要的指导意义。

3 塔里木和鄂尔多斯盆地台内裂陷勘探展望

台内礁滩勘探潜力是中国海相碳酸盐岩勘探亟需回答的问题。四川盆地震旦系-下寒武统德阳-安岳台内裂陷的刻画及安岳气田的发现证实了小克拉通台地台内勘探的潜力。

3.1 塔里木盆地南华纪台内裂陷

塔里木盆地南华纪一早寒武世发育近北东-南西走向台内裂陷,经历了南华纪裂陷期-震旦纪裂后拗陷期-震旦纪末抬升剥蚀-一早寒武世初台地淹没(陆棚)-一早寒武世缓坡台地5个演化阶段,与四川盆地震旦纪一早寒武世台内裂陷演化特征具有相似性。南华纪初罗迪尼亚超大陆裂解,形成了近北东-南西走向台内裂陷,与位于裂陷两侧的隆起带构成“两隆夹一坳”古构造格局。震旦纪转入裂后拗陷演化阶段,震旦系主要分布在南华系裂陷沉降形成的北部拗陷内。震旦纪末的抬升剥蚀,造成中央隆起带、柯坪-温宿、轮台断隆等地区震旦系全部或部分缺失。一早寒武世初期的全球性海泛使塔里木台地被淹没^[26],形成了一套黑色富有机质泥

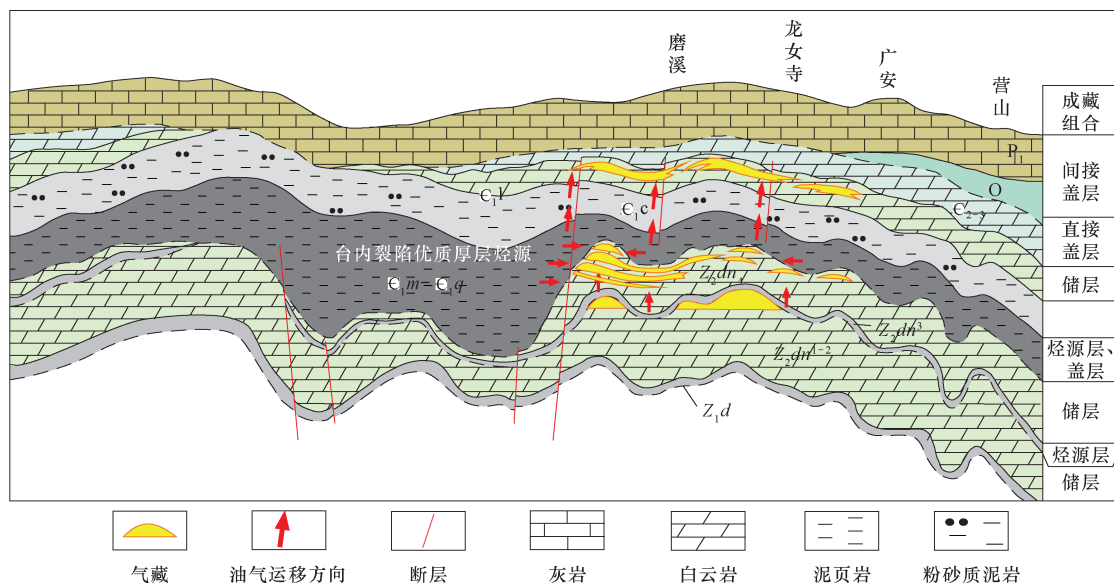


图6 四川盆地灯影组-下寒武统成藏组合示意图(据杜金虎,2015^[23] 修编)

Fig.6 The schematic diagram of the source-reservoir assemblage in the Lower Cambrian and Dengying Formation, Sichuan Basin (modified after Du,2015^[23])

Z_1d . 陡山沱组; Z_2dn^{1-2} . 灯一段-灯二段; Z_2dn^3 . 灯三段; Z_2dn^4 . 灯四段; C_1m . 麦地坪组; C_1q . 筇竹寺组; C_1c . 沧浪铺组; C_1l . 龙王庙组

页岩沉积。经玉尔吐斯组沉积期填平补齐,塔里木台地肖尔布拉克组沉积期进入缓坡碳酸盐台地发育阶段。

塔里木盆地南华纪一早寒武世台内裂陷的发育及演化控制了南华系-震旦系、玉尔吐斯组两套烃源岩和奇格布拉克组、肖尔布拉克组两套储集层的发育。

南华系-震旦系烃源岩:虽然无钻井探及,但露头资料揭示南华系-震旦系裂陷内烃源岩的发育具有普遍性^[27]。地震剖面显示在寒武系之下发育裂陷式楔形体反射,其边界清晰,槽内高低起伏,推测裂陷内部可能发育优质烃源岩。

玉尔吐斯组烃源岩:中深1井寒武系盐下原生气藏的发现,昆盖阔坦东、什艾日克沟等剖面 TOC 含量可达 7%~14%,星火1井 TOC 含量为 1%~9.43%,均值为 5.5%,均可以证实分布于中、下缓坡及深海盆地相带的玉尔吐斯组具有良好的生烃潜力^[4,26]。

奇格布拉克组丘滩白云岩储集层:阿克苏、铁克里克、库鲁克塔格露头剖面揭示,奇格布拉克组岩石类型以蓝细菌藻白云岩和颗粒白云岩为主^[28-29],原岩结构保存完好,与准同生期白云石化有关,藻架孔、粒间孔、铸模孔和溶蚀孔洞发育,是一套非常优质的微生物丘滩白云岩储集层,可以与四川盆地灯四段微生物丘滩白云岩储集层类比。

肖尔布拉克组丘滩白云岩储集层:肖尔布拉克组发育一套缓坡台地背景的台内丘滩白云岩^[30],具明显的相控性。丘滩体和表生溶蚀作用主控储集空间的发育,

其特征和成因与四川盆地龙王庙组颗粒滩白云岩储集层相似,均发育于裂陷填平补齐之后的缓坡台地背景。

3.2 鄂尔多斯盆地长城纪台内裂陷

鄂尔多斯盆地中-新元古代发育多个台内裂陷。至少 1 700 Ma 前华北克拉通就已经刚性化,属哥伦比亚超大陆的组成部分^[31-32]。到中元古代,随着超级大陆的裂解,华北克拉通进入台内裂陷发育阶段,发育贺兰古裂陷、晋陕古裂陷、熊耳古裂陷和燕山-太行古裂陷^[33-34]。近年来,针对鄂尔多斯盆地深层中-新元古界,开展了重磁力资料、深层地震资料的重新处理和解释工作,提出中元古代发育北东东向“二拗三隆”的构造格局,即伊盟古隆起、定边-榆林裂陷、庆阳-延安古隆起、铜川裂陷、渭北古隆起,地震剖面深层反射特征显示出拉张断陷结构。

长城系裂陷内发育多套烃源岩:燕辽裂陷中元古界发育多套优质烃源岩,分布面积广^[23]。蓟县剖面长城系-蓟县系发育 5 套烃源岩,累计厚度在 2 000~3 000 m,其中,下马岭组、洪水庄和串岭沟组等层系泥质烃源岩 TOC 含量为 0.85%~11.33%,平均为 4.28%,雾迷山组、高于庄组碳酸盐岩烃源岩 TOC 含量为 0.21~1.03%,平均为 0.65%。

长城系和蓟县系两套储集层:蓟县系储集层以白云岩为主,硅质白云岩基质胶结致密,部分层段发育残余晶间孔、溶蚀孔洞和微裂隙。镇探 1、宁探 1 和甸探 1 等井岩心可观测到洞穴角砾岩,表明曾发育岩溶孔

洞,初步预测蓟县系储集层在盆地西南部较发育。长城系储集层以石英砂岩和石英岩为主,储集空间以残余粒间孔和溶蚀孔为主。克1、鄂18等井中元古界取心分析孔隙度达2%~9%,渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,综合评价为低孔、低渗储集层。

4 结论

1) 罗迪尼亚泛大陆裂解为德阳-安岳晚震旦世一早寒武世台内裂陷的发育提供了区域地质背景,张性或剪切断裂、差异沉降作用是台内裂陷形成的关键。

2) 德阳-安岳坳陷是一个由张性或走滑断裂控制的继承性发育的构造-沉积单元,经历了灯二段侵蚀发育期-灯四段裂陷发育期-麦地坪组-沧浪铺组裂陷鼎盛-充填期-龙王庙组缓坡台地发育期的演化过程,其演化控制了筇竹寺组、麦地坪组2套烃源岩和灯四段、龙王庙组2套储集层的发育;烃源岩和储集层的空间配置构成“侧生侧储”和“下生上储”两类成藏组合。

3) 塔里木盆地南华纪、鄂尔多斯盆地长城纪台内裂陷特征和石油地质条件与德阳-安岳晚震旦世一早寒武世台内裂陷具相似性,勘探潜力值得期待。

参 考 文 献

- [1] 汪泽成,姜华,王铜山,等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3):305-312.
Wang Zecheng, Jiang Hua, Wang Tongshan, et al. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3):305-312.
- [2] 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.
- [3] 刘树根,王-刚,孙玮,等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(1):1-23.
Liu Shugen, Wang Yigang, Sun Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1):1-23.
- [4] 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 intracratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 37(1):1-16.
- [5] 周进高,沈安江,张建勇,等. 四川盆地德阳-安岳台内裂陷与震旦系勘探方向[J]. 海相油气地质,2018,23(2):1-9.
Zhou Jingao, Shen Anjiang, Zhang Jianyong, et al. Deyang-Anyue interplatform rift in Sichuan Basin and its direction of exploration in Sinian[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(2):1-9.
- [6] Baker B H, Wohlenberg J. Structure and evolution of the Kenya Rift Valley[J]. Nature, 1971, 229(5286):538-42.
- [7] Dennis J G, Murawski H. International tectonic lexicon[M]. E. Schweizerbart, 1979.
- [8] Linden W J M. Passive continental margins and intra-cratonic rifts, A Comparison[M]. Tectonics and Geophysics of Continental Rifts. Springer Netherlands, 1978.
- [9] Mats V D. The structure and development of the Baikal rift depression[J]. Earth-Science Reviews, 1993, 34(2):81-118.
- [10] Meredith A S, Williams S E, Brune S, et al. Rift and plate boundary evolution across two supercontinent cycles[J]. Global and Planetary Change, 2019, 173:1-14.
- [11] 冯娟萍,欧阳征健,周义军,等. 鄂尔多斯地区中元古界“拗拉槽”的重新厘定[J]. 西北大学学报(自然科学版),2018,48(04):587-592.
Feng Juanping, OuYang Zhengjian, Zhou Yijun, et al. Revision of the Mesoproterozoic “Aulacogen” in Ordos Area[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2018, 48(04):587-592.
- [12] 段金宝,梅庆华,李毕松,等. 四川盆地震旦纪-早寒武世构造-沉积演化过程[J]. 地球科学,2019,44(03):738-755.
Duan jinbao, Mei qinghua, Li bisong, et al. Sinian-early Cambrian tectonic-sedimentary evolution in Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(03):738-755.
- [13] 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(03):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(03):327-339.
- [14] 陈洪德,张成弓,黄福喜,等. 中上扬子克拉通海西-印支期(泥盆纪-中三叠世)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报,2011,27(08):2281-2298.
Chen Hongde, Zhang Chengong, Huang Fuxi, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Hercynian-Indosinian (Devonian-Middle Triassic)[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(08):2281-2298.
- [15] 马永生,牟传龙,谭钦银,等. 关于开江-梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质,2006(03):326-331.
Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough[J]. Oil & Gas Geology, 2006(03):326-331.
- [16] Xiong Xiaosong, Gao Rui, Guo Lianghui, et al. The deep structure feature of the Sichuan Basin and adjacent orogens[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2015, 89(4):1153-1164.
- [17] 刘树根,孙玮,罗志立,等. 兴凯地裂运动与四川盆地组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5):511-520.
Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan

- Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5): 511–520.
- [18] 宋金民, 刘树根, 孙玮, 等. 兴凯地裂运动对四川盆地灯影组优质储集层的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 658–670.
- Song Jinmin, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Control of Xingkai taphrogenesis on Dengying Formation high quality reservoirs in Upper Sinian of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 658–670.
- [19] 王剑, 刘宝珺, 潘桂棠. 华南新元古代裂谷盆地演化——Rodinia 超大陆解体的前奏[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 135–145.
- Wang Jian, Liu sBaojun Pan Guitang. Neoproterozoic rifting history of south China significance to Rodinia Breakup [J]. Mineral Petrol, 2001, 21(3): 135–145.
- [20] 王剑, 曾昭光, 陈文西, 等. 华南新元古代裂谷系沉积超覆作用及其开启年龄新证据[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(4): 1–7.
- Wang Jian, Zeng Zhaoguang, Chen Wenxi, et al. The Neoproterozoic rift systems in southern China: New evidence for thesedimentary onlap and its initial age [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(4): 1–7.
- [21] 李双建, 高平, 黄博宇, 等. 四川盆地绵阳—长宁凹槽构造演化的沉积约束[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(05): 49–58.
- Li Shuangjian, Gao Ping, Huang Boyu, et al. Sedimentary constraints on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 889–898.
- [22] 韩雨樾, 冉波, 李智武, 等. 四川盆地北缘下寒武统页岩生物标志化合物特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41(03): 435–442.
- Han Yuyue, Ran Bo, Li Zhiwu, et al. Characteristics of biomarker compounds and their implications for Lower Cambrian black shale on the northern margin of Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 435–442.
- [23] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- Du Jinhu, Wang Zecheng, Zou Caineng, et al. Geologic theory and exploration practice of ancient large carbonates gas field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [24] 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布——以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 704–715.
- Chen Yana, Shen Anjiang, Pan Liyin, et al. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: A case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 704–715.
- [25] 沈安江, 陈娅娜, 潘立银, 等. 四川盆地寒武统龙马庙组沉积相与储集层分布预测研究[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1176–1190.
- Shen Anjiang, Chen Yana, Pan Liyin, et al. The facies and porosity origin of reservoirs: Case studies from Longwang – miao Formation of Cambrian, Sichuan Basin, and their implications toreservoir prediction [J]. Natural Uas Ueoscience, 2017, 28(8): 1176–1190.
- [26] 石开波, 刘波, 姜伟民, 等. 塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 862–877.
- Shi Kaibo, Liu Bo, Jiang Weimin, et al. Nanhua-Sinian tectono-sedimentary framework of Tarim Basin, NW China[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 862–877.
- [27] 马新海, 王年梅, 田小彬. 塔东地区震旦系白云岩成因及储层发育模式[J]. 断块油气田, 2019, 26(05): 566–570.
- Ma Xinhai, Wang Nianmei, Tian Xiaobin. Genesis mechanism and reservoir model of Sinian dolomite in eastern Tarim area [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(05): 566–570.
- [28] 刘伟, 沈安江, 柳广弟, 等. 塔里木盆地塔东地区下古生界碳酸盐岩储集层特征与勘探领域[J]. 海相油气地质, 2016, 21(2): 1–12.
- Liu Wei, ShenAnjiang, Liu Guangdi, et al. Characteristics and exploration domains of lower Paleozoic carbonate reservoirs in eastern Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2016, 21(2): 1–12.
- [29] 何金有, 郭光辉, 李启明, 等. 塔里木盆地震旦系石油地质特征及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(5): 482–484.
- He Jinyou, Wu Guanghui, Li Qiming, et al. Petroleum geologic characteristics and hydrocarbon exploration objectives of Sinian in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(5): 482–484.
- [30] 乔占峰, 沈安江, 倪新锋, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 392–402.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Ni Xinfeng, et al. Types of mound shoal complex of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 392–402.
- [31] 沈其韩, 耿元生, 宋会侠. 华北克拉通的组成及其变质演化[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 387–406.
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Song Huixia. Constituents and Evolution of the Metamorphic Basement of the North China Craton [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 387–406.
- [32] 李三忠, 赵国春, 孙敏. 华北克拉通早元古代拼合与 Columbia 超大陆形成研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(9): 919–925.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min. Paleoproterozoic amalgamation of the North China Craton and the assembly of the Columbia supercontinent [J]. Chin Sci Bull, 2016, 61(9): 919–925.
- [33] 路凤香, 郑建平, 王方正, 等. 华北克拉通、扬子克拉通与秦岭造山带古地幔组成及状态的对比[J]. 地球科学, 1997, 22(3): 25–29.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Wang Fangzhen, et al. The comparison of constitution and thermal condition in north China Craton (NC), Yangtze Craton (YZ) and Qinling (QL) Orogenic Belt [J]. Earth Science – Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(3): 25–29.
- [34] 刘超辉, 刘福来. 华北克拉通中元古代裂解事件: 以渣尔泰—白云鄂博—化德裂谷带岩浆与沉积作用研究为例[J]. 岩石学报, 2015, 31(10): 3107–3128.
- Liu Chaohui, Liu Fulai. The Mesoproterozoic rifting in the North China Craton: A case study for magmatism and sedimentation of the Zhaertai – Bayan Obo – Huade rift zone [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 3107–3128.