

四川盆地绵阳-长宁凹槽构造演化的沉积约束

李双建^{1,2}, 高平^{1,2}, 黄博宇³, 王海军⁴, 沃玉进^{1,2}

[1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化构造与沉积储层实验室, 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 中国石化西南油气分公司, 贵州 贵阳 550001]

摘要:系统收集了四川盆地绵阳-长宁凹槽内外的露头 and 钻井资料, 根据地层不整合、岩性变化、测井曲线对比和岩石地球化学等沉积记录, 对绵阳-长宁凹槽在震旦纪—早寒武世的构造演化进行了研究。研究发现, 凹槽内下寒武统存在明显的上超, 保留了下寒武统与震旦系灯影组之间的侵蚀暴露界面, 并且残留的灯影组具有早期岩溶现象, 表明凹槽在寒武纪沉积前存在暴露侵蚀过程。地层沉积旋回对比表明, 凹槽内黑色岩系较正常的麦地坪组多一套沉积旋回, 而且凹槽内资阳1井元素测井显示黑色岩系下部发育20 m厚的含硅泥质白云岩, 结合邻区钻井分层认识, 认为凹槽内黑色岩系不止是寒武系麦地坪组, 还包括震旦系灯影组三段和四段。另外, 灯影组四段硅质岩具有明显的热液成因特征, 也证明当时具有强烈的区域拉张背景。结合中新元古代—寒武纪岩浆岩活动记录和南华纪地层发育特征, 认为绵阳-长宁凹槽是在南华纪裂谷基础上, 持续负地貌继承性发育起来的, 是间歇性拉张沉降和暴露剥蚀联合作用的结果, 因此该凹槽的构造属性为拉张-侵蚀槽。

关键词:沉积记录; 灯影组; 寒武系; 震旦系; 绵阳-长宁凹槽; 四川盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Sedimentary constraints on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough in the Sichuan Basin

Li Shuangjian^{1,2}, Gao Ping^{1,2}, Huang Boyu³, Wang Haijun⁴, Wo Yujin^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China; 2. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC, Guiyang, Guizhou 550001, China]

Abstract: Mianyang-Changning trough is developed during the transitional period from the Sinian to Early Cambrian in Sichuan Basin. We systematically collected the outcrop samples and drilling data both inside and outside the trough and analyzed its tectonic evolution according to stratigraphic unconformity, lithological variation, log correlation and geochemical data. The results show that there are pronounced onlaps on the Lower Cambrian sequences in the trough, keeping the erosional unconformity between the Lower Cambrian and Sinian Dengying Formation intact. In addition, evidences of early stage karstification occur in the residual Dengying Formation, indicating that the trough has experienced exposure and erosion before the Cambrian sedimentation. Meanwhile, the sedimentary cycle correlation demonstrates that there is an additional sedimentary cycle in the Maidiping Formation with normal proportion of black rocks in the trough. Moreover, elemental logging in Well Ziyang-1 inside the trough shows that there are 20 m-thick siliceous argillaceous dolomites developed in the lower part of the black rocks. Thus, in combination with the stratigraphic division based on drilling data in the adjacent areas, we believed that the black rocks within the trough include not only the Cambrian Maidiping Formation, but also the 3rd and 4th members of the Sinian Dengying Formation. Besides, the hydrothermal origin of siliceous rocks in the 4th member of the Dengying Formation proves that strong regional extension exists during that time. According to the Middle Neoproterozoic-Cambrian magmatic activity records and the characters of the Nanhua sedimentary strata, we considered that the Mianyang-Changning trough inherited from the persistent negative landforms on the basis of Nanhua

收稿日期: 2018-05-15; 修订日期: 2018-07-08。

第一作者简介: 李双建(1978—), 男, 博士、高级工程师, 油气盆地分析。E-mail: lishuangjian_syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目(91755211); 国家科技重大专项(2017ZX05005-001); 中石化重点科技攻关项目(P16079, P17049)。

rift, and it was formed under the combined effect of intermittent extensional subsidence and denudation from exposure. Therefore, the trough is an extensional-erosional trough in tectonics.

Key words: sedimentary record, Dengying Formation, Cambrian, Sinian, Mianyang-Changning trough, Sichuan Basin

依据最新钻井分层和地震标定的解释成果,应用印模法恢复震旦系顶面古地貌,显示四川盆地绵阳-长宁地区发育一个北西-南东向展布的凹槽,由于其成因、构造属性、演化时间及控油气作用方式等关键问题至今仍存在争议,因此本文称之为凹槽。该凹槽具有北西和南东两端宽、中间窄的特征,内部充填厚层下寒武统碎屑岩沉积(图1)。该凹槽的发现与安岳气田的勘探发现密切相关,同时也指导了该气田后续的勘探开发。

绵阳-长宁凹槽的识别与刻画来源于新的钻井和地震资料,在新的钻井分层资料指导下,钟勇等^[1]根据大量地震剖面,识别出深层前震旦系张性断裂,刻画了凹槽肩部震旦系顶界的“陡坎”的几何特征,认为是早寒武世拉张作用形成的^[1]。刘树根等^[2-3]提出兴凯地裂运动是控制该凹槽形成的主要原因,震旦纪末期一早寒武世由于深层地幔上涌,震旦系抬升受到剥蚀,之后的拉张作用造成地面沉降,拉张始于下寒武统麦地坪组,止于下寒武统沧浪铺组,根据麦地坪组-沧浪铺组的地层厚度,刻画了凹槽的展布,并将之命名为“绵阳-乐至-隆昌-长宁拉张槽”。在凹槽发现之后,大

量学者从不同角度对其成因和控烃、控储和控藏作用做了详细的研究^[4-9]。尽管绵阳-长宁凹槽的展布得到了广泛的认可,但是关于该凹槽的成因还存在很多争议,主要有侵蚀槽^[4-5]、拉张槽^[2-3,6,8]、克拉通内裂陷^[9-12]和拉张侵蚀槽^[13]等多家观点(表1)。从形成时间上看,存在寒武纪早期^[2-3,6,8,14]、前震旦纪裂谷继承性活动^[10-12]、灯一期-龙王庙期^[7]和震旦纪^[13]等多种认识(表1)。对拉张槽形成时间和构造成因的不同认识会影响到对拉张槽两侧储层成因与分布的认识,一般认为形成于早寒武世侵蚀成因的拉张槽不会控制灯影组藻滩成因的储层分布,而如果认为震旦纪灯影期拉张槽开始发育,则拉张槽两侧会发育高能相带控制的储层。

本文通过地震剖面对凹槽内外地层不整合的识别、充填物沉积特征和钻井测井曲线的对比,进一步对凹槽的成因和构造演化阶段进行了剖析,提出了新的构造演化模型,探讨了凹槽形成的动力学背景,以期能为全面认识四川盆地震旦纪末一早寒武世构造演化和油气地质条件提供帮助。

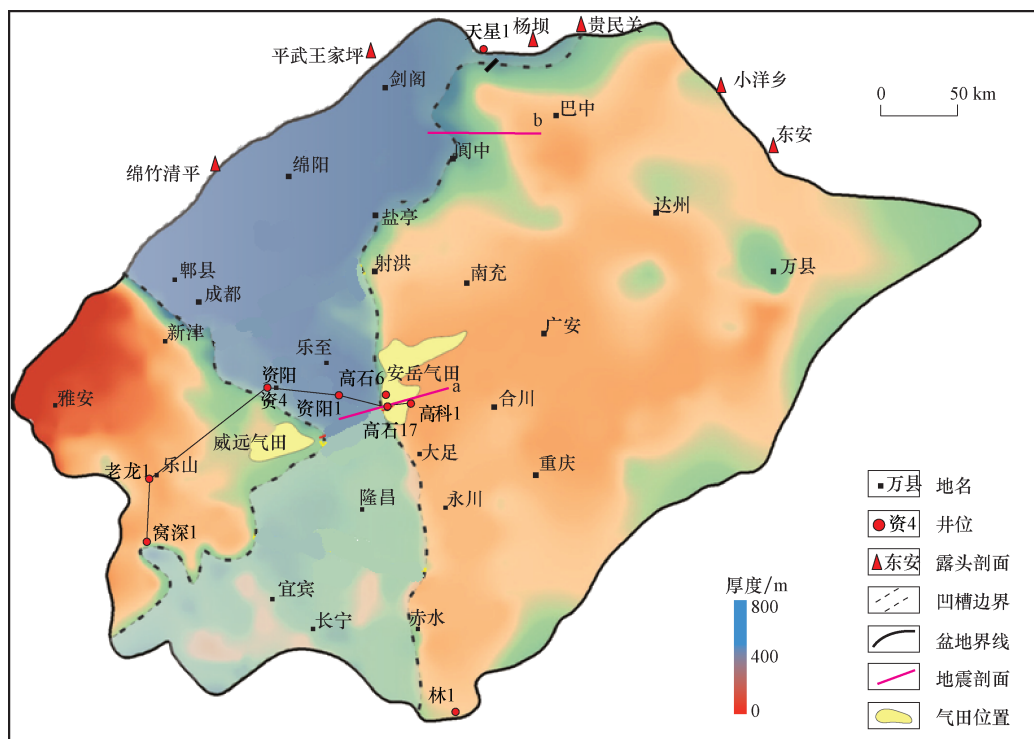


图1 四川盆地下寒武统等厚图及绵阳-长宁凹槽位置(据文献[3]修改)

Fig. 1 Isopach map of the Lower Cambrian and location of Mianyang-Changning trough in Sichuan Basin (modified from reference [3])

表 1 前期关于绵阳 – 长宁凹槽构造演化认识的统计

Table 1 Previous studies on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough

构造成因	构造活动时限	主要证据	文献来源
侵蚀槽	灯四段末期	灯影组顶面发育地层假整合接触、风化残积层、钻具放空,岩心发育溶沟、溶缝、溶洞等岩溶识别标志	杨雨等,2014 ^[4] 周慧等,2015 ^[5]
拉张槽	早寒武世	地震剖面显示下寒武统增厚;下寒武统麦地坪组发育热液硅质岩和磷质岩	钟勇等,2013 ^[1] 刘树根等,2013 ^[2] 李伟等,2015 ^[7]
侵蚀 – 拉张槽	震旦纪末期隆升或暴露剥蚀,早寒武世拉张沉降	地震剖面显示的侵蚀特征;拉张槽内发育灯影组岩溶	刘树根等,2015 ^[3] 邢凤存等,2015 ^[8] 李忠权等,2015 ^[13]
克拉通内裂陷	前震旦纪裂谷继承性活动	裂陷槽内灯影组三段、四段连续沉积,以泥质岩为主,地层厚度薄,为 3 ~ 10 m	邹才能等,2014 ^[9] 魏国齐等,2015 ^[11] 杜金虎等,2016 ^[12]

1 绵阳 – 长宁凹槽地层侵蚀记录

1.1 寒武系地层超覆记录

地层超覆是沉积水体进退的标志,可以直接判断下伏地层是否受到过侵蚀或剥蚀。从过绵阳 – 长宁凹槽的地震剖面上可以见到灯影组顶部存在凹凸不平特征,而且从凹槽最深部位到边缘可见由低向高多次的地层上超,表明下寒武统沉积前海水曾经完全退出。这种上超特征在凹槽中部和北部都可以见到(图 2)。

1.2 震旦系 – 寒武系之间地层侵蚀不整合记录

震旦纪一早寒武世,四川盆地经历了多期构造抬升,形成了至少 3 期较大规模的不整合,即桐湾运动 I 幕形成的灯影组三段与二段之间的不整合,桐湾运动

II 幕形成的下寒武统麦地坪组与灯四段之间的不整合,桐湾运动 III 幕形成的下寒武统筇竹寺组与麦地坪组之间的不整合^[7]。由于地层揭露比较少,这 3 期不整合在绵阳 – 长宁凹槽内表现并不完整。通过野外露头 and 钻井岩心的观察与调研,发现凹槽内存在震旦系与下寒武统之间的侵蚀暴露面。位于凹槽向西北延伸中心部位的平武金凤村剖面上可以见到,震旦系灯影组与寒武系邱家河组存在明确的侵蚀面,下伏地层为灰质白云岩夹硅质条带,上覆地层为邱家河组,主要由炭硅质板岩夹硅质岩、结晶灰岩及劣质铁锰矿层组成,两套地层之间发育凹凸不平的不整合(图 3a),而且存在明显的岩性差异,因此,下寒武统沉积前,凹槽内存在沉积间断。另外,王家坪剖面向南,同样位于凹槽内的绵竹清平剖面也见到了震旦系与下寒武统之间的侵蚀暴露面,下伏地层为灯二段富藻云岩,上覆地层为含

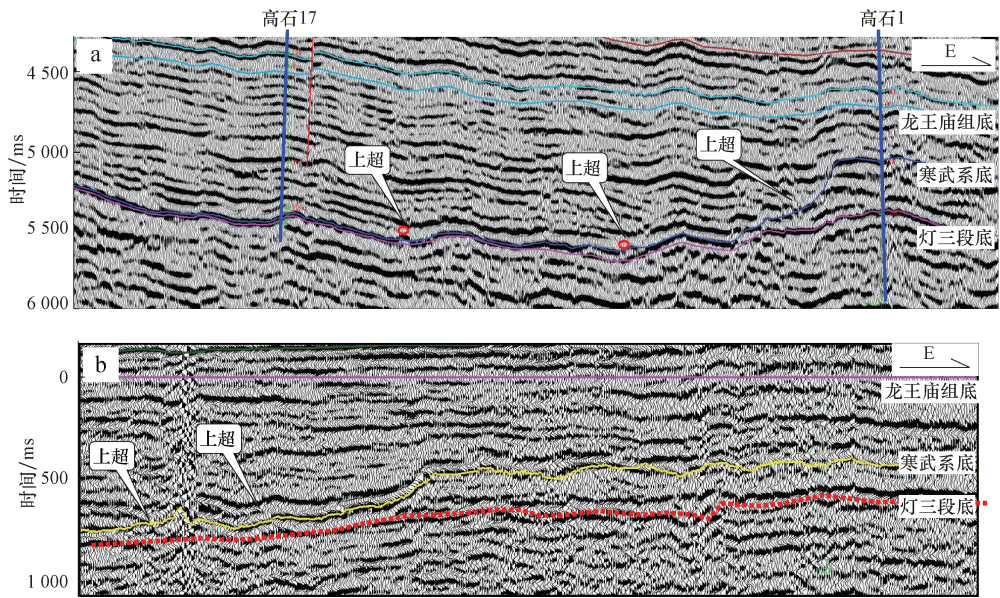


图 2 绵阳 – 长宁凹槽内寒武系上超现象

Fig. 2 Onlaps of the Cambrian within Mianyang-Changning trough

a. 凹槽中部地震剖面;b. 凹槽北部地震剖面

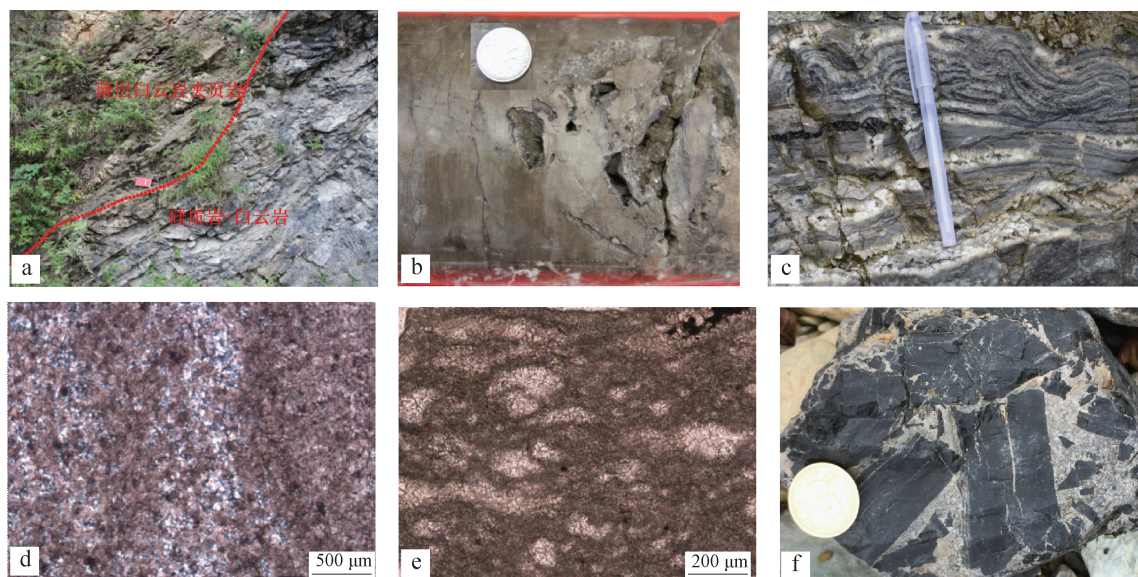


图3 绵阳—长宁凹槽内震旦系灯影组露头 and 典型岩心照片

Fig. 3 Outcrops and typical core photos of the Dengying Formation in Mianyang-Changning trough

a. 平武县金凤村剖面, 寒武系与震旦系不整合; b. 资阳1井, 灯一段, 泥晶云岩发育溶蚀孔隙; c. 绵竹清平, 灯二段, 藻纹层白云岩岩溶现象; d. 资阳1井, 灯一段, 泥晶白云岩中硅化现象; e. 高石17井, 灯二段, 瘤状泥晶白云岩; f. 广元市朝天区东溪河乡剖面, 灯影组顶部的硅质岩碎屑流

硅含磷的邱家河组, 推测为与下寒武统麦地坪组同期的地层。

1.3 凹槽内震旦系岩石暴露记录

除了地层不整合以外, 凹槽内还可见到灯影组白云岩的溶蚀现象, 如资阳1井钻井岩心可观察到灯二段泥晶云岩局部溶蚀孔洞、缝发育, 见沥青细脉, 次生石英、泥质等局部充填(图3b)。绵竹清平剖面也见到了灯影组灯二段明显的溶蚀孔洞, 部分藻纹层白云岩溶蚀后呈花斑状、葡萄状和花边状, 溶蚀孔洞中充填有白云石、方解石, 局部有沥青(图3c), 另外凹槽内资3和资4井也可见到灯影组二段顶部岩溶和下寒武统麦地坪组顶部溶蚀孔洞中的碎屑岩充填^[7]。这些证据说明, 灯影组二段末期、灯四段末期和麦地坪组末期, 包括绵阳—长宁凹槽在内的整个四川盆地都曾大范围暴露。

2 绵阳—长宁凹槽构造拉张记录

2.1 凹槽内拉张期同沉积记录

从凹槽内钻井揭示的沉积来看, 资阳1井和高石17井灯影组均为水动力能量较低的沉积产物, 主要岩性为泥晶白云岩和瘤状泥晶白云, 广元朝天东溪河剖面上还见到了灯影组硅质岩碎屑流沉积(图3d—f), 证明绵阳—长宁凹槽在震旦纪晚期已经存在, 槽内的沉积环境为陆棚相, 向北西方向水体加深, 凹槽边缘为

深水斜坡相。从地震剖面上看, 沿凹槽两侧灯影组四段储层具有明显加厚的现象(图2), 厚层的白云岩主要是藻丘滩白云岩, 并且在钻井中获得了证实, 沿台缘带向北东由高石1—磨溪8—磨溪10—女基井—广探2井, 随着灯四段变薄, 藻丘滩减薄, 储层变差^[9,12,15-16]。这些现象从侧面上证实了灯影组沉积期凹槽已经存, 并且控制了凹槽肩部高能滩相的发育。

2.2 硅质岩地球化学记录

灯影组部分白云岩还发育了较为严重的早期硅化, 这种成层性的硅化在四川盆地灯影组四段比较普遍, 主要发生在准同生期, 前人对峨边先锋和彭水罗家湾灯影组硅质岩的主量元素作了分析, 结果显示这些硅质岩具有贫Al, 富Fe的特点, 其形成主要与海底热水活动有关^[7,17-18]。本文对四川盆地多个钻井和剖面的灯影组硅质岩做了稀土元素分析, 结果表明硅化白云岩和硅质岩的REE分布模式普遍显示正Eu异常(图4), 指示硅质岩的沉积与热液流体密切相关, 而且正Eu异常较明显的资阳1、天星1和高石6井均分布于古裂隙内部及边缘, 揭示热液活动可能与边界断裂活动有关, 由此可以说灯影组沉积时绵阳—长宁凹槽均发育拉张作用。

2.3 凹槽内残存灯影组三段和四段的证据

绵阳—长宁凹槽是否存在灯影组三段和四段, 对确定凹槽的形成时间与构造构造属性极为重要。目前

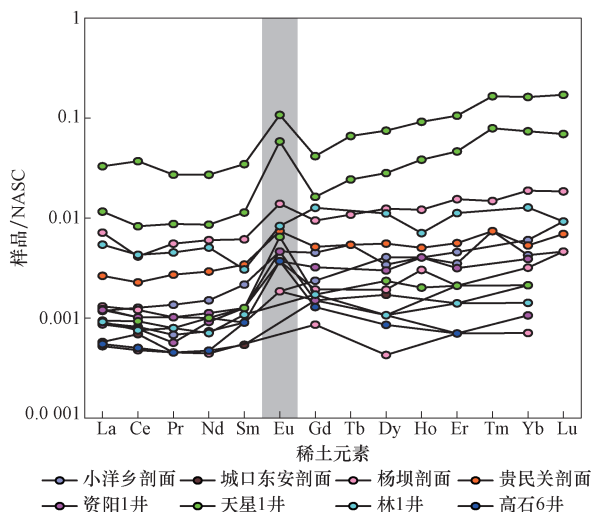


图4 四川盆地灯影组四段硅质岩稀土元素配分图

Fig. 4 REE distribution of siliceous rocks in the 4th member of the Dengying Formation in Sichuan Basin

凹槽内的钻井在灯影组白云岩顶部揭示了厚层的黑色泥岩、页岩和硅质云岩,普遍认为是下寒武统麦地坪组^[8,15],但也有人认为该套黑色岩系包含灯影组三段和四段^[12]。

麦地坪组最早作为震旦系-寒武系分界的金钉子剖面在云南昆明梅树村剖面被详细的研究过^[19-22]。麦地坪组自下而上可以分布小歪头山段、中谊村段和大海段。小歪头山段主要发育灰黑色中薄层硅质岩、硅质白云岩,向上渐变为含浅灰色磷质白云岩、泥质岩,顶部薄层泥质白云岩、硅质泥岩及粉砂岩互层;中谊村段主要发育蓝灰色薄-中层鲕粒状白云质硅质磷块岩,中间加灰白色凝灰岩;大海段主要发育灰白色中厚层砂质细晶白云岩夹白云质页岩,含磷质和硅质条带。自下而上麦地坪组经历了一次海侵-海退的旋回,发育两段含磷层系(图5),主体为还原-弱氧化的沉积环境。多年来依据生物化石、碳同位素和稀土元素异常和锆石定年对寒武系底界的界定逐渐取得了较为一致的认识,即寒武系底界应该位于小歪头山段底界,该界面首次发现了小壳生物化石,而且沉积年代上更接近寒武系底界标准年龄值 542 Ma^[22-23]。

通过灯影组四段和麦地坪组都齐全的2口井(老龙1井和窝深1井)对麦地坪组特征进行了总结。麦地坪组测井曲线具有自然伽马呈尖峰状起伏,电阻率明显降低的特征,而上覆筇竹寺组主要为高伽马和低-中电阻特征,下伏灯影组主要为稳定的低伽马和高电阻特征。从自然伽马和电阻率曲线上可以看出自灯三段到麦地坪组主要经历了二次海侵和海退旋回,麦地坪组自身经历了一次海侵和海退旋回。凹槽内的

资4井、资阳1井和高石17井,从测井曲线上看,凹槽内黑色岩系主要经历了二次海侵和海退旋回,与地层齐全的麦地坪组相比多了一个沉积旋回(图6)。另外,前人对高石17井灯影组进行了重新划分^[11],认为该井灯四段残留15 m厚的浅灰色泥质云岩,灯三段沉积厚度仅为2 m,岩性为深灰色泥岩。资阳1井从麦地坪组往下,存在约20 m的GR值突然升高段,5 222~5 228 m井深段GR值高达600 API,与高石17井GR值尖峰相似。这种高GR值响应,在很多钻井和露头中都得到证实^[7],如峨边先锋剖面灯三段中发育0.5 m的凝灰质泥岩和凝灰岩层,其GR值高达285 API;威远古隆起上灯三段主要以蓝灰色泥岩为主,这种蓝灰色泥岩为火山灰蚀变的产物,其GR值也较高,如威117和威28井蓝灰色泥岩的GR值可达100 API,这些证据说明资阳1井存在灯三段和灯四段。

根据元素测井结果来看,资阳1井在寒武系黑色岩系底部5 225~5 240 m层段, Ca, Mg, Si含量较高而Al含量低,说明该段含硅质为白云岩,碎屑物源输入较少,与高石17井灯三段和灯四段岩性相似,为较深水沉积的产物。另外该段之上出现低Ca和Mg,高含Si和Mn层段,指示岩性转变为含锰的硅质岩,与川西清平剖面下寒武统底部邱家河组特征相似,因此推断资阳1井5 225 m之上,含锰硅质岩为下寒武统,5 225~5 240 m层段硅质白云岩为震旦系灯影组三段和四段。根据测井曲线解释,灯三段厚约4 m,灯四段厚约11 m。对震旦系灯影组三段、四段和寒武系麦地坪组3个层段的地层厚度进一步细分发现,灯三段厚度横向上比较稳定,而灯四段和麦地坪组厚度横向上变化大(图6),说明尽管凹槽内自灯三段沉积以来存在持续的较深水沉积,但是不排除灯四段末期和麦地坪组末期发生地层剥蚀的可能。

3 绵阳-长宁凹槽构造演化

绵阳-长宁凹槽在早寒武世存在大规模拉张已经取得了共识,但是在此之前凹槽经历了侵蚀还是拉张,不同的学者存在不同的认识。本文根据凹槽内外地层的沉积记录,认为该凹槽是多期拉张和侵蚀综合作用的结果。灯影组一段和二段沉积期凹槽存在负地貌雏形,但差异不大;灯二段末期桐湾运动I幕,整体抬升,凹槽受深切侵蚀,灯二段变薄;灯三段沉积期海侵,初期为浑水沉积,泥质含量多,GR值升高,碎屑沉积物沉积在古地貌低洼处;灯四段沉积期第一次强拉张,硅质岩和硅质云岩发育,在凹槽肩部高部位白云岩沉积加

厚,进一步扩大了地形高差;灯四段末期桐湾运动Ⅱ幕,四川盆地整体抬升,海水全部退出,凹槽进一步受到河流的深切侵蚀;麦地坪组沉积期第二次强拉张,初期碎屑沉积GR值升高,晚期海水变浅,在上升洋流和陆缘碎屑联合作用下,沉积了胶磷矿;麦地坪组末期,桐湾运动Ⅲ幕,四川盆地再次整体抬升,凹槽内海水未完全退出,在凹槽西北部存在连续的寒武系沉积;筇竹寺组沉积期,再次大规模海侵,同时伴随同沉积沉降,该期的拉张作用较弱,直至早寒武世晚期凹槽被碎屑物质充填,该拉张-侵蚀槽结束了构造演化(图7)。

学者们普遍认为绵阳-长宁凹槽的构造演化与扬子板块中-新元古代以来持续的拉张背景有关^[10-13],部分学者认为造成Rodina大陆裂解的地幔上涌动力一直持续到震旦期末^[3,14],地幔上涌造成了震旦系的

剥蚀和下寒武统的快速沉积。部分学者认为绵阳-长宁凹槽是扬子西缘被动大陆边缘拉张作用向陆内扩展的一种表现^[12]。实际上根据扬子地块周缘中-新元古代岩石学证据,与Rodina大陆裂解有关的基性岩浆岩年龄主要集中在820~750 Ma,主要分布在扬子西缘、北缘和东南缘,分布比较广泛^[24-27]。最新研究表明,四川盆地深层也存在该时期的碱性花岗岩,代表地幔和地壳物质重融后的混合产物^[28],说明中-新元古代大陆裂解作用在克拉通内部形成了新的裂谷。中-新元古代一早寒武世最晚期的基性岩年龄为650~635 Ma,主要分布在扬子北缘武当山地区,分布比较零星和局限^[29]。结合扬子区南华纪裂谷盆地的充填特征,认为Rodina裂解的开始期为820~800 Ma,华南岩石圈减薄,同时伴有强烈的裂谷作用;790~760 Ma裂

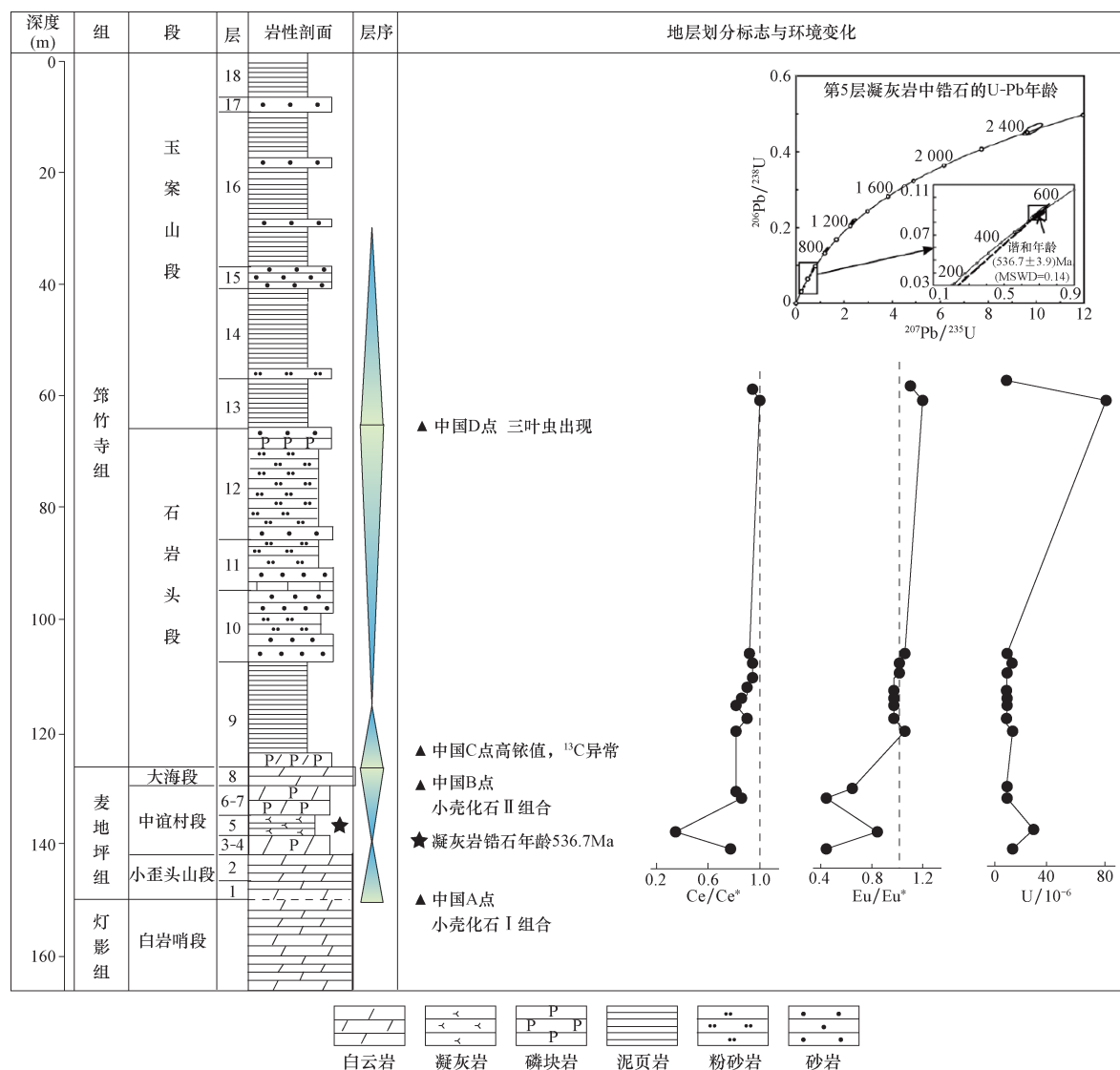


图5 云南昆明梅树村剖面早寒武世沉积与地质事件(据文献[21-23]汇编)

Fig. 5 Sedimentation and geological events of the Early Cambrian recognized on Meishucun section, Kunming, Yunnan Province (compiled from references [21-23])

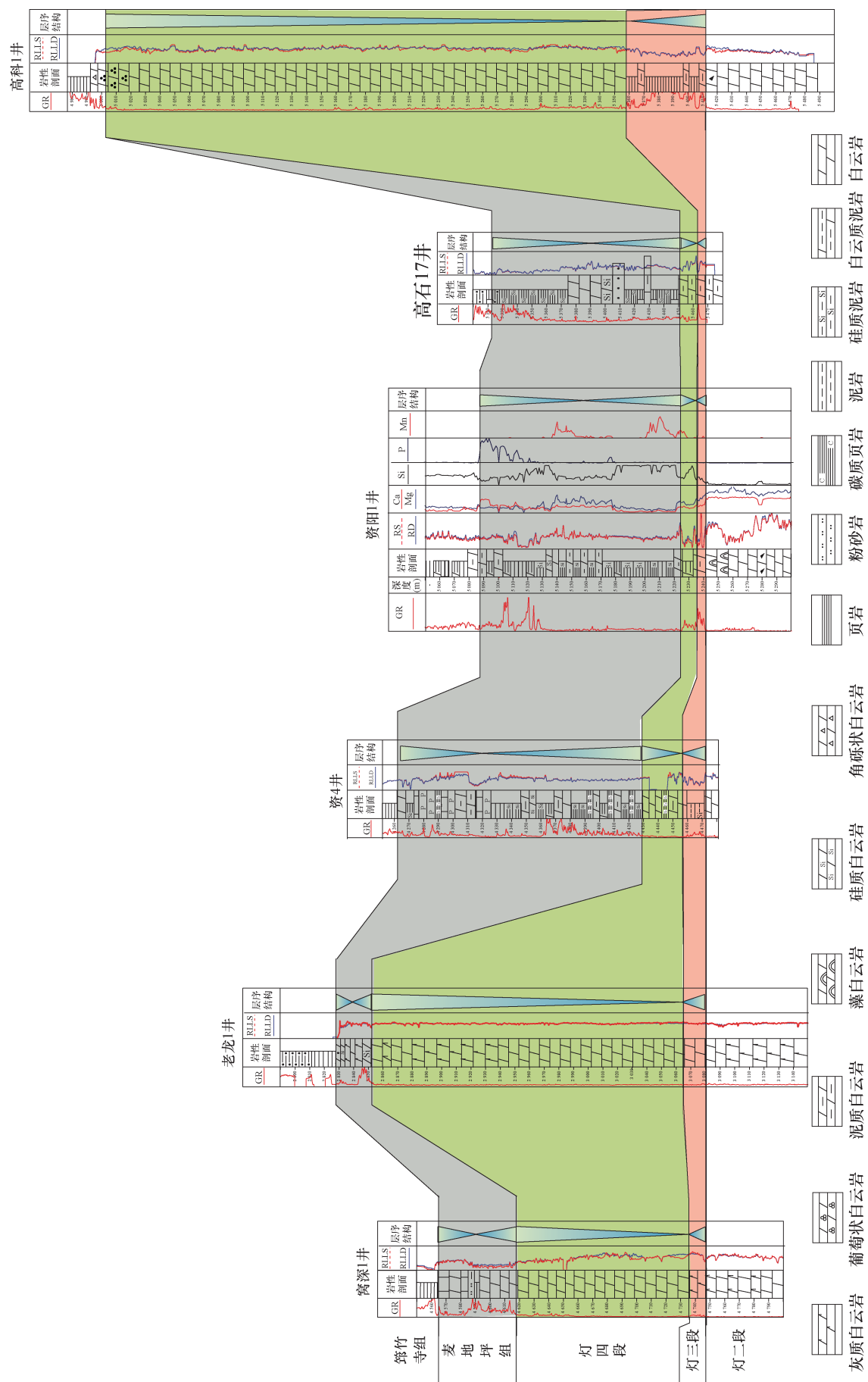


图6 绵阳-长宁凹槽两侧灯影组与麦地坪组地层对比(钻井位置见图1)

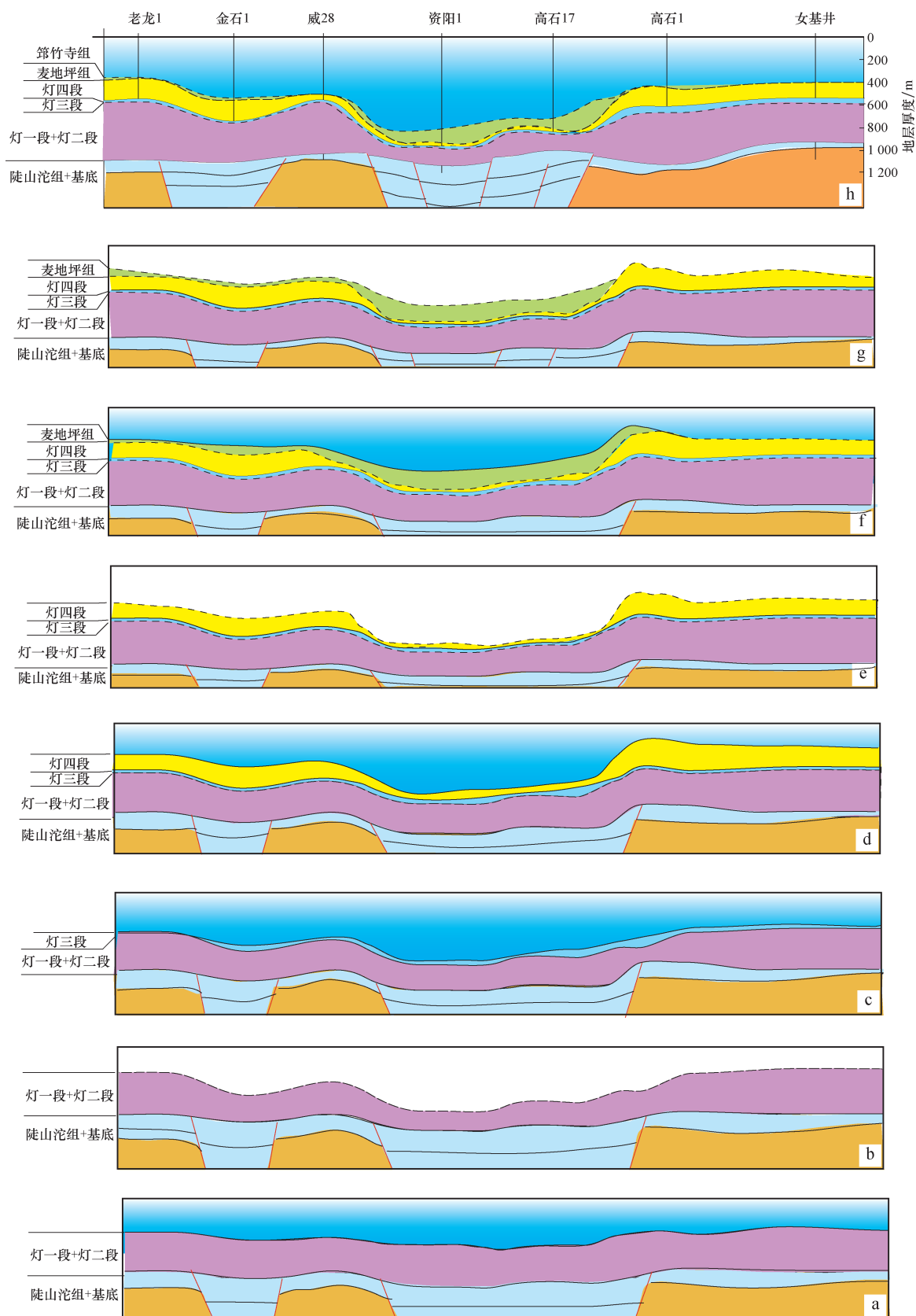


图7 绵阳-长宁凹槽构造演化模式

Fig. 7 A model for the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough

a. 灯影组二段沉积期; b. 灯影组二段末期, 桐湾运动 I 幕; c. 灯影组三段沉积期; d. 灯影组四段沉积期; e. 灯影组四段末期, 桐湾运动 II 幕;
f. 麦地坪组沉积期; g. 麦地坪组末期, 桐湾运动 III 幕; h. 筇竹寺组沉积期

谷峰期,岩石圈的厚度可能进一步变薄,这一时期地幔柱活动主要在扬子西缘和桂北地区,证据是基性岩墙群以及细碧岩等高温玄武质岩石;700~635 Ma 裂谷充填与被动大陆形成阶段,随着能量的消耗,地幔物质的逐渐冷却,裂谷作用减弱,大陆裂谷带中块体差异升降运动停止,形成受区域性热沉降作用控制的被动大陆边缘,随着陡山沱组盖帽白云岩的出现,华南地区南华纪的地堑式沉积被广泛的浅海沉积取代。虽然南秦岭随枣地区可以见到650~635 Ma左右的基性岩侵入体,它仅代表扬子北缘在新古代的晚期仍有比较强烈的拉张活动,其他地区整体上进入了比较稳定的克拉通演化阶段,地幔柱的活动趋于平静。

由四川盆地中新元古代-寒武纪大陆裂解的构造演化过程来看,绵阳-长宁凹槽的形成和演化与地幔上涌的关系不大,不存在震旦纪末隆升与拉张再沉降的动力背景。该凹槽可能与四川盆地深层南华纪裂谷充填后再活动有关。震旦纪末-一早寒武世期,四川盆地在早期裂谷基础上,于裂谷肩部形成碳酸盐岩高地,裂谷核部形成相对深水沉积,桐湾运动的区域隆升,造成早期凹槽内河流深切侵蚀,进一步加强了凹槽内外的地貌差,经历了间歇性的拉张和侵蚀,逐步形成了现今的绵阳-长宁拉张-侵蚀槽。

4 结论

1) 绵阳-长宁凹槽内存在明显的侵蚀作用,保留了下寒武统与震旦系灯影组之间的侵蚀暴露面,并且可以见到下寒武统与震旦系之间的大范围的上超记录。

2) 绵阳-长宁凹槽内也存在明显的继承性深水沉积记录,凹槽内残留的震旦系灯影组二段白云岩较两侧水体沉积能量更低,发育台缘斜坡环境下的硅质岩碎屑流,台缘带地层加厚,发育藻丘滩,凹槽内灯影组四段相变为硅质岩岩和硅质页岩。岩石地球化学特征显示,硅质岩沉积与同期拉张作用导致的热活动有关。

3) 综合沉积记录与区域构造背景分析认为,绵阳-长宁凹槽是在南华纪裂谷基础上,持续负地貌继承性发育起来的,是灯影组二段以来间歇性拉张与区域抬升剥蚀切联合作用的结果,因此该凹槽的构造属性为拉张-侵蚀槽。

参 考 文 献

- [1] 钟勇,李亚林,张晓斌,等. 四川盆地组合张性构造特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5):498-510.
Zhong Yong, Li Yanan, Zhang Xiaobin, et al. Features of extensional structures in pre-Sinian to Cambrian strata, Sichuan Basin, China

- [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5): 498-510.
- [2] 刘树根,孙玮,罗志立,等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[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.
- [3] 刘树根,孙玮,宋金民,等. 四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J]. 地学前缘,2015,22(3):146-160.
Liu Shugen, Sun Wei, Song Jinmin, et al. Tectonics-controlled distribution of marine petroleum accumulations in the Sichuan Basin, China [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 146-160.
- [4] 杨雨,黄先平,张健,等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义[J]. 天然气工业,2014,34(3):38-43.
Yang Yu, Huang Xianping, Zhang Jian, et al. Features and geologic significances of the top Sinian karst landform before the Cambrian deposition in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 38-43.
- [5] 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 intraplate formal basin in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 310-323.
- [6] 钟勇,李亚林,张晓斌,等. 川中古隆起构造演化特征及其与早寒武世绵阳-长宁拉张槽的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(6):703-712.
Zhong Yong, Li Yanan, Zhang Xiaobin, et al. Evolution characteristics of Central Sichuan palaeoplatform and its relationship with Early Cambrian Mianyang-Changning intracratonic sag [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 703-712.
- [7] 李伟,刘静江,邓胜微,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. 石油学报,2015,36(5):546-563.
Li Wei, Liu Jingjiang, Deng Shengwei et al. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas, 2015, 36(5): 546-563.
- [8] 邢凤存,侯明才,林良彪,等. 四川盆地晚震旦世-早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. 地学前缘,2015,22(1):115-125.
Xing Fengcun, Hou Mingcai, Lin Liangbiao, et al. The records and its dynamic genesis discussion of tectonic movement during the Late Sinian and the Early Cambrian of Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 115-125.
- [9] 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.
Zhou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, 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.
- [10] 杨志如,王学军,冯许魁,等. 川中地区前震旦系裂谷研究及其地质意义[J]. 天然气工业,2014,34(3):80-85.
Yang Zhiru, Wang Xuejun, Feng Xukui, et al. Geological research and significance of a rift valley in the Presinian period in central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 80-85.

- [11] 魏国齐,杨威,杜金虎,等. 四川盆地震旦纪一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.
- [12] 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, Zhou Caineng, et al. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze its control effect on the formation of Anyue giant field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 1-16.
- [13] 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): 26-34.
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): 26-34.
- [14] 刘树根,王一刚,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): 1-22.
Liu Shugen, Wang Yigang, Sun Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 1-22.
- [15] 马文辛,刘树根,陈翠华,等. 渝东地区震旦系灯影组硅质岩地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(2): 160-171.
Ma Wenxin, Liu Shugen, Chen Cuihua, et al. geochemical characteristics of the siliceous rock in the Upper Sinian Denying Formation in the eastern Chongqing China [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2011, 30(2): 160-171.
- [16] 彭军,徐望国. 湘西上震旦统层状硅质岩沉积环境的地球化学标志[J]. 地球化学, 2001, 30(3): 293-299.
Peng Jun, Xu Wangguo. Geochemical characteristics of depositional environment of the Upper Sinian bedded siliceous rocks in western Hunan province [J]. Geochimica, 2001, 30(3): 293-299.
- [17] 刘静江,李伟,张宝民,等. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 岩相古地理学报, 2015, 17(6): 735-753.
Liu Jingjiang, Li Wei, Zhan Baomin, et al. Sedimentary palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze Region [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(6): 735-753.
- [18] 罗冰,杨跃明,罗文军,等. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 416-426.
Luo Bing, Yang Yueming, Luo Wenjun, et al. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 416-426.
- [19] 罗惠麟,蒋志文,武希彻,等. 中国云南晋宁梅树村震旦系—寒武系界线层型剖面[M]. 昆明:云南人民出版社,1984. 154.
Luo Huilin, Jiang Zhiwen, Wu Xiche, et al. Meishucun Sinian-Cambrian Boundary in Jinning, YunNan, China [M]. Kunming: People's Press of Yunnan, 1984, 154.
- [20] Sawaki Y, Nishizawa M, Suo T, et al. Internal structures and U-Pb ages of zircons from a tuff layer in the Meishucunian formation, Yunnan Province, South China [J]. Gondwana Research, 2008, 14(1-2): 148-158.
- [21] 徐林刚, Bernd Lehmann, 张锡贵, 等. 云南昆阳磷矿黑色页岩微量元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1817-1827.
Xu Lingang, Lehmann B, Zhang Xigui, et al. Trace element distribution in black shales from the Kunyang phosphorite deposit and its geological significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1817-1827.
- [22] 朱日祥,李献华,侯先光,等. 梅树村剖面离子探针锆石 U-Pb 年代学:对前寒武纪—寒武纪界线的年代制约[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2009, 39(8): 1105-1111.
Zhu Rixiang, Li Xianhua, Hou Xianguang, et al. SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, southwest China: Constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary [J]. Science China (Ser. D): Earth Science, 2009, 39(8): 1105-1111.
- [23] 唐烽,高林志,尹崇玉,等. 华南伊迪卡拉(震旦)系顶部建群层型和界线层型新资料[J]. 地质通报, 2015, 34(12): 2150-2162.
Tang Feng, Gao Linzhi, Yin Chongyu, et al. Macrofossil biotas in the Late Ediacaran-Cambrian boundary interval of South China and stratotype correlation [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(12): 2150-2162.
- [24] 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 Baojun, Pan Guitang, et al. Neoproterozoic rifting history of south China: Significance to Rodinia breakup [J]. Journal of Mineral Petrology, 2001, 21(3): 135-145.
- [25] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Zhou Hanwen, et al. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. Geology, 2002, 30(2): 163-166.
- [26] 李献华,王选策,李武显,等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义:从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 382-398.
Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting [J]. Geochimica, 2008, 37(4): 382-398.
- [27] Wang Xuance, Li Xianhua, Li Wuxian, et al. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in South China: A review [J]. Gondwana Research, 2009, 15(3-4): 381-395.
- [28] 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, 44(10): 2210-2220.
- [29] 夏林圻,夏祖春,李向民,等. 南秦岭东段耀岭河群、陕西群、武当山群火山岩和基性岩墙群岩石成因[J]. 西北地质, 2008, 41(3): 1-28.
Xia Linxin, Xia Zuchun, Li Xiangmin, et al. Petrogenesis of volcanic rocks and mafic dyke swarms in the eastern part of the southern Qinling Mountains and the volcanic rocks and group rocks of the Wudang Mountains group [J]. Northwest Geology, 2008, 41(3): 1-28.