DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04001
汪正江,王启宇,杨菲,熊国庆,马龙,杜秋定,郑炳嵩,2022. 扬子西缘泛非造山与绵阳—长宁克拉通裂陷的沉积充填过程研究. 沉积与特提斯地质,42(3):350-367. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04001
WANG Z J, WANG Q Y, YANG F, XIONG G Q, MA L, DU Q D, ZHENG B S, 2022. Study on the deposition and filling process of the Mianyang-Changning cratonic rift: Implication for the pan-African orogeny on the western margin of Yangtze Block. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3):350-367. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04001

扬子西缘泛非造山与绵阳-长宁克拉通裂陷的沉积充填过程研究

汪正江[1,2],王启宇[1,2],杨 菲[1,2],熊国庆[1,2],马 龙[1,2],杜秋定[3],郑炳嵩[3]
(1. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室,四川 成都 610081;2. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081;3. 西南石油大学地球科学与技术学院,四川 成都 610500)

摘要:四川盆地安岳震旦—寒武系特大型气田的发现,掀起了探索四川盆地深层油气勘探新领域的热潮。然而对于川西北深层原型盆地沉积充填过程及其动力学机制的认识尚处于探索阶段。本文通过对扬子西北缘及盆内典型钻井震旦—寒武纪地层序列的综合调查与区域对比研究,基于关键事件序列的系统厘定,重建了扬子西北缘及邻区新元古代—寒武纪原型盆地沉积充填格架;对比全球冈瓦纳大陆汇聚与泛非造山过程,系统厘定了泛非运动在扬子西缘的沉积-构造-岩浆作用记录,进一步明确了华南扬子克拉通为新元古代末期冈瓦纳大陆的一部分。同时,结合盆内最新深层钻井和二维地震资料解析,研究认为绵阳-长宁克拉通边缘裂陷的成生、发展、充填与折返隆升过程主要受控于扬子西缘的泛非期弧后伸展、弧陆碰撞及陆陆碰撞造山过程,研究提出绵阳-长宁克拉通边缘裂陷经历了如下6个演化阶段:①陡山沱早期克拉通边缘裂陷开启,表现为克拉通边缘的裂陷与快速沉降;②陡山沱晚期—灯影早期为克拉通裂陷的持续沉降与克拉通碳酸盐台地的补偿性生长,区域沉积分异明显;③灯影晚期为克拉通裂陷扩展、定型与碳酸盐台地的活化与重建;④麦地坪期为克拉通边缘的差异隆升与碳酸盐台地的风化剥蚀;⑤筇竹寺期为克拉通增生陆块边缘的构造活化与克拉通边缘的挤压挠曲沉降;⑥沧浪铺期为陆陆碰撞造山与克拉通边缘裂陷的快速充填。至沧浪铺末期,绵阳-长宁克拉通裂陷沉积充填结束,并快速折返隆升为天井山-川中古隆起。因此,本文对扬子西缘克拉通边缘裂陷的盆地动力学过程重塑,不仅为华南板块在冈瓦纳古大陆重建中的构造定位提供了新资料,亦将对探索川西北乃至四川盆地深层油气勘探新领域、新方向具有重要的启示意义。

关 键 词:扬子西缘;泛非运动;克拉通边缘裂陷;四川盆地;盆地动力学过程;深层油气
中图分类号:P618.13 **文献标识码:**A

Study on the deposition and filling process of the Mianyang-Changning cratonic rift: Implications for the Pan-African orogeny on the western margin of Yangtze Block

WANG Zhengjiang[1,2], WANG Qiyu[1,2], YANG Fei[1,2], XIONG Guoqing[1,2], MA Long[1,2], DU Qiuding[3], ZHENG Binsong[3]
(1. *Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources*, *Ministry of Natural Resources*, *Chengdu* 610081, *China*; 2. *Chengdu Center*, *China Geological Survey*, *Chengdu* 610081, *China*; 3. *School of Geoscience*

收稿日期:202-01-13;**改回日期:**2022-04-08 **责任编辑:**郭秀梅 **科学编辑:**邓奇 **英文审校:**王高明
作者简介:汪正江(1969—),男,博士,研究员,主要从事沉积大地构造与含油气盆地研究。E-mail:wzjcf@sina.com
资助项目:中国地质调查局能源矿产地质调查项目(DD20211210,DD20221661)、四川省科技厅重点研发项目(2022YFS0466)、中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010102)。

and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500, China)

Abstract: The discovery of Moxi Sinian-Cambrian mega gas field has set off a new exploration boom of deep oil and gas in Sichuan Basin. However, the understanding of the filling process and the dynamic mechanism of the deep prototype marine basin in northwestern Sichuan is still in the probing stage. Through a comprehensive investigation and regional comparison, the deposition and filling frame of the new Proterozoic-Cambrian prototype basin in the northwest margin and its adjacent area have been reconstructed based on the systematic determination of key events. Compared with the global Gondwana assembly and the pan-African orogeny process, the deposition-structure-magmatic records of the Pan-African orogeny have been systematically determined, which indicates that the Yangtze block was a part of the Gondwana supercontinent at the end of the Neoproterozoic. The latest deep drilling data and two-dimensional seismic data analysis suggest that the whole process of the onset, development, filling and return to uplift of the Mianyang-Changning cratonic margin rift was mainly controlled by Pan-African arc extension and arc-land collision on the west margin of Yangtze block, revealing that Mianyang-Changning cratonic rift went through six stages: ① The Early Doushantuo period in which the cratonic margin rift was opening and followed by the subsidence and rapid filling; ② The Late Doushantuo to Early Dengying period in which cratonic margin rift continuously subsided with the compensatory growth of carbonate platform and the obvious regional deposition differences; ③The Late Dengying period through which the craton margin rift went expansion and shaping and the carbonate platform experienced activating and reconstruction; ④ The Maidiping period in which differential uplift of the craton margin was accompanied with the weathering and erosion of the carbonate platform; ⑤The Qiongzhusi period through which Yangtze craton went structure activation and compressing subsidence; ⑥The Canglangpu period in which the craton margin rift was rapidly filled due to the arc-continent and continent-continent collision. By the end of the Canglangpu period, the Mianyang-Changning cratonic rift finished filling and quickly turned into the Tianjing Mountain-Middle Sichuan uplift. The remodeling of the basin's dynamic process on the west margin of Yangtze craton not only provides new information of the positioning of the South China plate for the reconstruction of Gondwana, but also has important implications for the exploration of new fields of deep oil and gas in northwestern Sichuan Basin.

Key words: West margin of Yangtze Block; Pan-African Orogeny; craton margin rift; Sichuan Basin; basin dynamics process; deep oil and gas

0　引言

四川盆地绵阳 – 长宁裂陷槽的成因及其形成演化时限,关系到与之相关的沉积古地理恢复、储层预测和油气成藏研究的可靠性,更关系到对四川盆地深层油气资源前景的认识和勘探方向的选择,是一个重要的基础性和前瞻性问题。自磨溪地区震旦纪裂陷槽边缘带丘滩相勘探突破(邹才能等, 2014; 魏国齐等, 2015a,b; 杜金虎等, 2016)以来,大规模面上甩开的勘探成效相较预期差距较大,则反映出盆地深层的古地理格局与油气聚集成藏规律的复杂性。

为此相关学者深入开展了上扬子地区震旦纪的沉积古地理的再认识(刘静江等, 2015; 周进高等, 2017; 刘树根等, 2018; 李智武等, 2019; 汪泽成等, 2019, 2020; 汪正江等, 2021)。同时,对于绵阳 – 长宁克拉通裂陷的开启时限、沉积充填过程及其构造动力学(刘树根等, 2013, 2016; 汪泽成等, 2014; 杨雨等, 2014; 李伟等, 2015; 周慧等, 2015; 魏国齐等, 2015b; 梅庆华等, 2016; 杜金虎等, 2016; 刘静江等, 2021)也开展了大量的研究与探索,深化了对裂陷槽的形成演化与区域展布特征的认识,但仍存在诸多争议。特别是绵阳 – 长宁克拉通裂陷的成生动力学究竟是什么? 裂陷何时开启、又为何被快速充填? 灯影期是否发育台缘丘滩相? 丘滩相发育又是否受控于克拉通裂陷? 这些问题严重制约了深层油气的勘探部署,亟待解决。

本文以扬子西北缘露头剖面调查和盆地内部典型钻井资料为依托,基于四川盆地早期充填序列及其关键事件的系统厘定,拟对绵阳 – 长宁克拉通裂陷的开启时限、充填过程及其动力学机制开展深入解剖,以期为川西北深层油气勘探方向选择提供新思路。

1　扬子西北缘震旦—寒武纪的地层划分对比与关键事件识别

1.1　典型露头剖面的地层划分对比与关键事件识别

扬子西北缘新元古代—早古生代沉积盆地演化记录出露较好的地区有摩天岭地块、松潘－甘孜地块东北段的轿子顶地区、龙门山前缘的天井山地区及汉南的米仓山地区等。

1.1.1　摩天岭地块

该地块总体上似一个倒向东南的斜歪褶皱，其核部为新元古代早中期的碧口群（950～850Ma，Xiao et al.，2007；Wu et al.，2009），被新元古代中期的花岗岩、辉长岩等侵入（885～830Ma；赖绍聪等，2007；平先权等，2014；游军等，2018）。其南翼地层有南华系木座组和震旦系蜈蚣口组、水晶组，且地层保存不完整。北翼相对复杂些，根据前人调查成果和已有的同位素年代学数据判断，应该包含代表 Rodinia 裂解的双模式火山岩组合之莲沱组（Yan et al.，2004；Wanget al.，2008）；南华系（即横丹群，Gao et al.，2020）厚度大，应包含 Sturtian 和 Marinoan 冰期及间冰期沉积，而陇南关家沟组可能仅是横丹群的一部分（图 1）；震旦系沿摩天岭地块南北边缘展布，出露零星，序列不完整。

1.1.2　松潘－甘孜地块

即轿子顶以东的后龙门山地区。该区发育的地层序列可划分为两个阶段，第一阶段就是作为褶皱基底的通木梁群，其主要为一套细碧岩－角斑岩－石英角斑岩建造，形成时代为新元古代早期（Liet al.，2018），并经历了 Rodinia 裂解期和印支期的岩浆侵入与热液改造（裴先治等，2009；Li et al.，2018）。第二阶段主要为震旦纪及早寒武世地层，依次是碓窝梁组、胡家寨组、元吉组、邱家河组和油

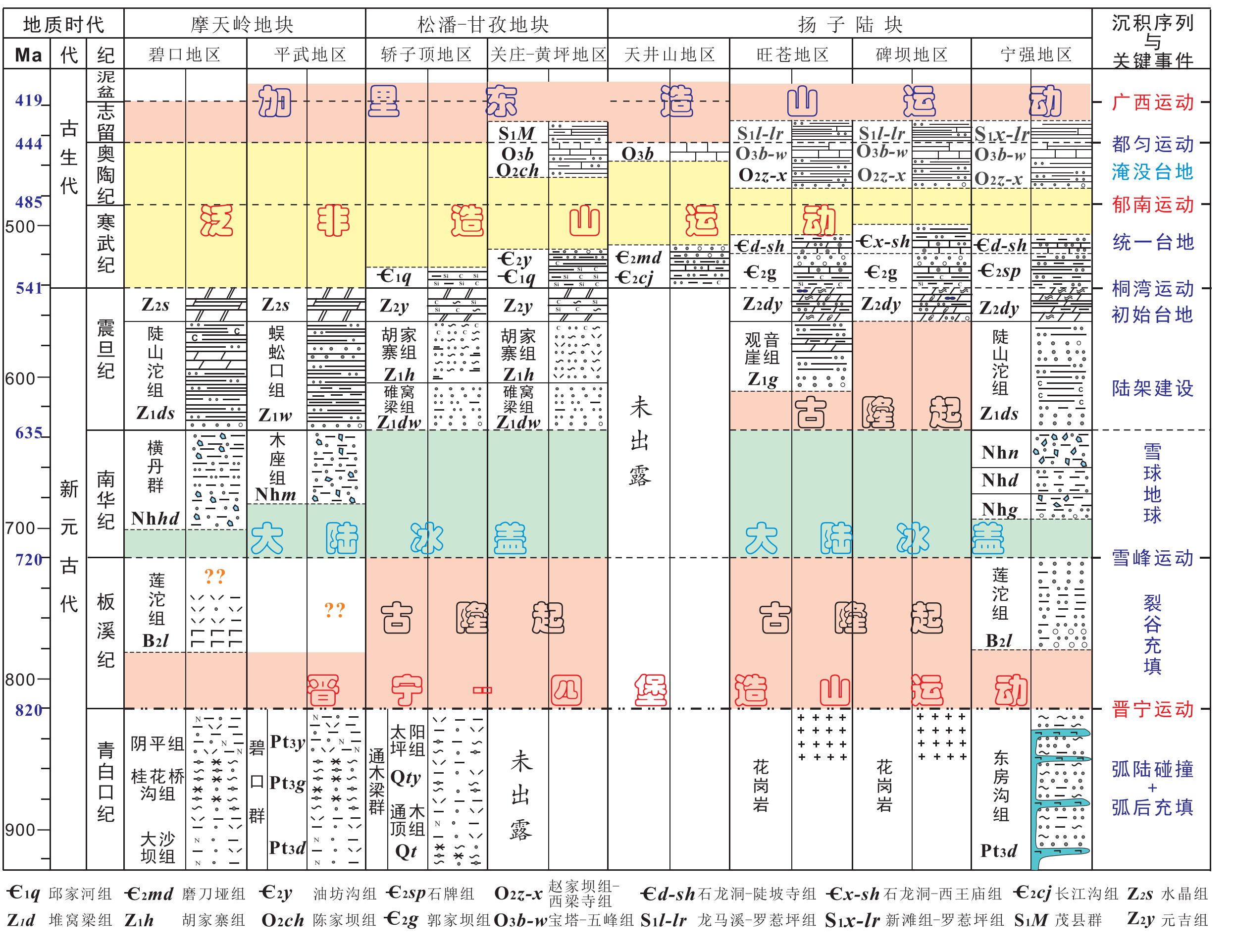


图 1　扬子西北缘新元古代—早古生代沉积序列与关键事件（汪正江等，2016，2017）

Fig. 1　Neoproterozoic to early Paleozoic deposition sequences and it's key events on the northwest margin of Yangtze Block（Modified from Wang Z J et al.（2016，2017））

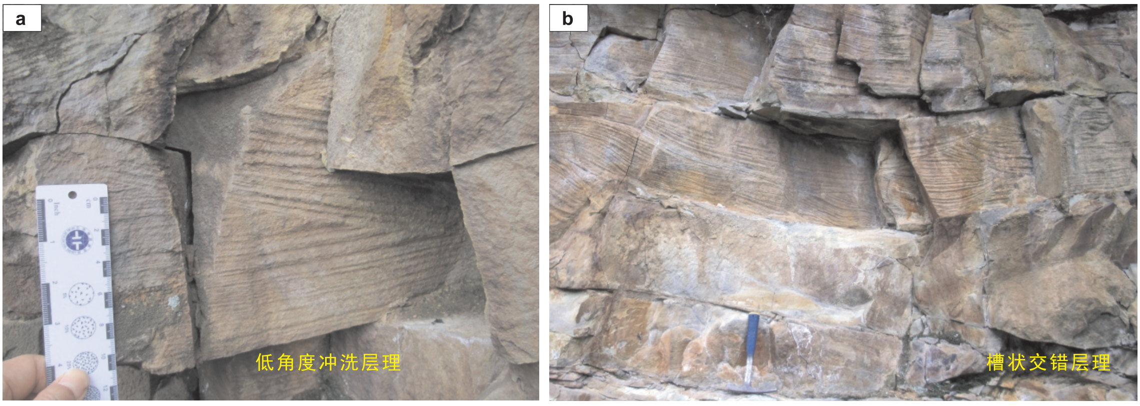


图 2　青川房石宪家沟碓窝梁组砂岩,发育多种层理构造

Fig. 2　The sandstone of the Duiwoliang Formation from Xianjiagou section in Fangshi Town, universally developing a variety of bedding structures

坊沟组(图 1)。

根据最新调查,轿子顶周缘的碓窝梁组沉积水动力作用强,发育多种层理构造(图 2),为正常滨—浅海沉积环境,超覆不整合在通木梁群变质岩之上,与上覆胡家寨组整合连续沉积,其中未发现冰碛砾岩或冰水沉积特征,应归入震旦系为宜,可能为绵阳-长宁克拉通边缘裂陷的第一套沉积(图 1)。胡家寨组的最大特色就是厚度大(500 ~ 2000m),岩石成分成熟度和结构成熟度低(区别于蜈蚣口组),似快速沉降背景下的类复理石快速充填,且后期遭受变质变形较强,时代相当于陡山沱中晚期。震旦纪晚期为元吉组,三分性明显(图 1),上下皆为泥晶白云岩,中段为硅质岩、硅质云岩,总体厚度不大。

寒武系邱家河组主要为炭质硅质岩夹炭质页岩、夹砂质页岩,厚度一般在 50 ~ 200m,下部以硅质岩为主,上部以炭质页岩为主。油坊沟组则表现为一套多韵律叠置、厚度巨大、夹多层火山碎屑岩/凝灰岩的快速充填序列,上部发育厚层—块状岩屑砂岩、含砾岩屑粗砂岩,总体显示出向上砂质/砂体变多、韵律厚度变大的进积序列。

1.1.3　上扬子克拉通西缘

扬子陆块上不同构造单元的沉积序列差异性,也是甚为明显的。

天井山地区位于龙门山北段,出露地层较为简单,主要为下寒武统长江沟组和磨刀垭组。磨刀垭组之上直接为宝塔灰岩超覆,其间缺失地层甚多。同时,其深部是否发育有南华系和板溪系,是一个问题,但从区域对比看,发育震旦系是可以肯定的,且可与轿子顶地区对比。

米仓山西北缘,可能属于天井山隆起向东北的延伸,是扬子西北缘新元古代—早古生代地层序列出露最完整的地区。代表性的剖面有宁强胡家坝剖面和朝天青林剖面。宁强胡家坝地区褶皱基底为新元古代早期的东房沟组变质砂泥岩,其时代应与碧口群相当,其中发育大量与新元古代中期 Rodinia 裂解有关的辉长、辉绿岩脉。

胡家坝地区的板溪系莲沱组早期为河流回春沉积,显示出河流→三角洲→浅水陆棚→潮坪演化序列,南华系发育两界河组(36m)、古城组(109m)、大塘坡组(42m)和南沱组(286m),表明其沉积充填与南华裂谷系同步(汪正江等, 2015),但与绵阳-长宁克拉通裂陷似有不同。

胡家坝地区的震旦系陡山沱组和灯影组分段性好(图 1),与扬子克拉通主体的沉积-构造演化基本一致。陡一段底部为厚层块状岩屑砂岩,显示出明显的冰消进积特点,往上砂岩变细、层厚减薄;陡二段发育黑色炭质页岩;陡三段下部为灰绿色砂质页岩、粉砂岩,往上出现块状含砾粗砂岩,为一个向上变粗的逆粒序;陡四段为灰色—深灰色薄层粉—细砂岩、炭质硅质页岩,为一个往上变深的退积序列。灯影组一+二段为皮壳状、栉壳状白云岩夹硅质/化白云岩;三段为深灰色灰质云岩、泥质灰岩夹炭质页岩薄层;四段为厚层块状白云岩、藻砂屑白云岩、藻纹层白云岩等,夹角砾状云岩。

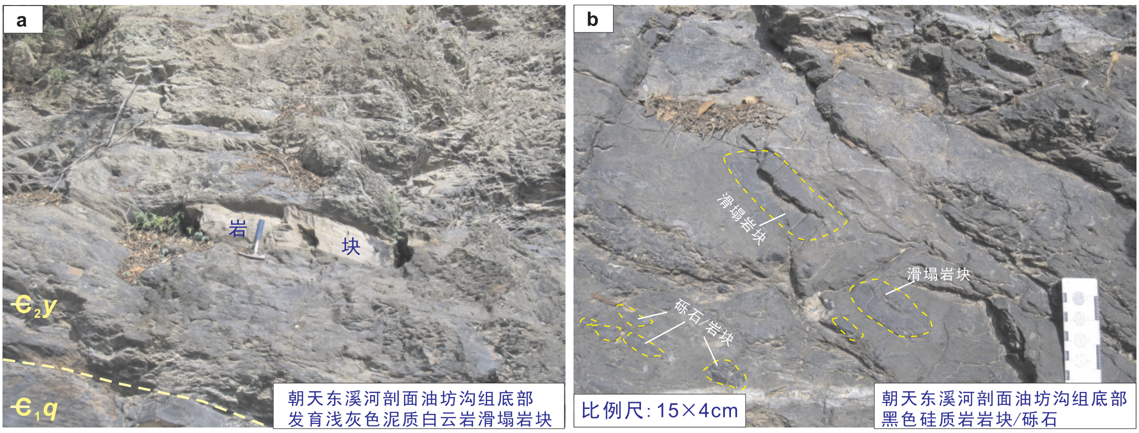
宁强地区的寒武系麦地坪组不易识别,可能与差异升降与隆升剥蚀有关;石牌组下部有黑色炭质泥页岩,上部为浅灰色砂质泥岩夹含藻灰岩和砂岩透镜体;沧浪铺组为厚层—块状含砾粗砂岩、硅质砂砾岩(砾石以黑色硅质岩为主)夹紫灰色泥页岩,

其与上覆奥陶系湄潭组(赵家坝组+西梁寺组)不整合接触,缺失中上寒武统和下奥陶统。

广元朝天地区则又有不同,其寒武纪早期沉积序列清楚。麦地坪沉积期为邱家河组硅质岩夹炭质页岩,底部可见角砾岩,上部为炭质页岩夹菱锰矿;油坊沟组为岩屑砂岩与粉砂质岩多韵律互层,底部发育滑塌岩块和硅质砾岩(图3),砂岩往上规模逐渐变大、粒度变粗,显示出明显的进积特征,其上为中奥陶统陈家坝组沉积超覆,缺失中上寒武统和下奥陶统。

米仓山南缘的旺苍和碑坝地区,缺失新元古代板溪期和南华冰期沉积,震旦系直接超覆在新元古代早期的花岗岩或更老的地层之上。震旦系陡山沱组的沉积序列也是往东逐渐变少、变薄,至碑坝地区灯影组直接超覆在后河岩群或新元古代花岗岩之上。灯影组三分明显,一+二段为厚层白云岩、藻白云岩,三段为砂岩、砂质泥页岩,四段为硅质白云岩、藻白云岩等。

旺苍地区寒武系依次为麦地坪组白云质硅质岩、硅质白云岩,筇竹寺组炭质页岩、砂质泥页岩,仙女洞组厚层鲕粒—豆粒灰岩、砂屑灰岩,阎王编组为砂岩-含砾砂岩-硅质砂砾岩组合(磨拉石)。石龙洞组为白云岩、泥质白云岩、砂质云岩,陡坡寺组/西王庙组为紫红色泥岩、云质泥页岩夹泥质白云岩。陡坡寺组与上覆奥陶系湄潭组不整合接触,缺失上寒武统和下奥陶统。



朝天东溪河剖面邱家河组为硅质岩、白云质硅质岩;油坊沟组为深灰色炭质泥页岩、粉砂质岩,其底部发育多个含顺层滑塌岩块(a)的砂质泥岩与深灰色泥页岩韵律,往上夹硅质细砾岩透镜体(b),砾石基本为黑色硅质岩。

图3 寒武纪早期关键事件的沉积响应记录

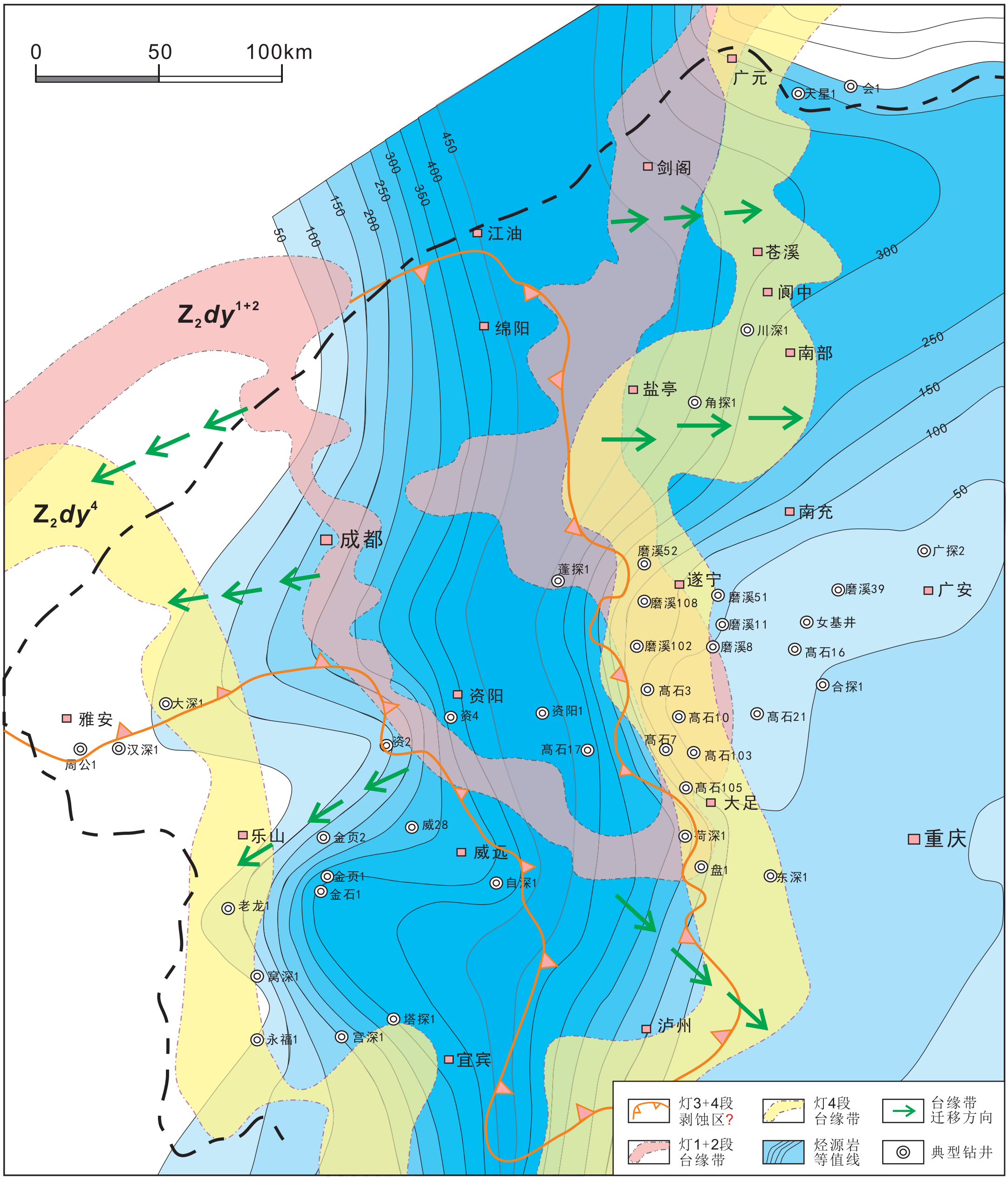
Fig. 3 Record of the sedimentary response to key events during the early Cambrian period

1.2 典型钻井剖面的地层划分对比与关键事件识别

四川盆地目前完整揭示震旦—寒武系的钻井不多。根据所处的古地理位置,大体上可划分为两类:一类是处于绵阳-长宁克拉通裂陷内的钻井,如高石17井、资阳1井等;另一类为处于克拉通裂陷边缘或碳酸盐台地之上的钻井,如西缘的金石1井、老龙1井,或裂陷东缘高石1井、角探1井、蓬探1井、川深1井等(图4)。由于所处的构造古地理不同,地层序列及其沉积相类型也是不同的,这也是导致认识分歧的主要原因。

对于缺失寒武纪沉积的地区(二叠系超覆在灯影组白云岩之上,如汉深1井、周公1井等),或处于碳酸盐台地高部位(如威远-龙女寺古隆起高点,如女基井等),地震或测井解释认为这些地区缺失部分灯影组三段、四段,或被隆升剥蚀了,甚至缺失部分下寒武统麦地坪组,考虑到浅水相区海平面变化的显著影响及海侵上超的超前滞后叠加效应,是可以理解的。但若认为处于深水沉积区(如高石17井、资阳1井等)也缺失灯影晚期沉积(图4),从沉积古地理学的角度看,短时间内发生如此规模的海平面变化是不可想象的。下面以资阳1井地层划分为例做些讨论。

处于绵阳-长宁克拉通裂陷内的高石17井、资阳1井等,虽划分对比有所不同,但大部分学者认为其地层序列还是连续的(邹才能等,2014;李双建等,2018;段金宝等,2019;等等)。根据已有相关资料分析,资阳1井的GR、CNL、DEN曲线及Si、Mn和P元素含量曲线(图5)均支持资阳1井井区地层序列是完整的认识。



①灯影组一＋二段、四段台缘带据汪泽成等(2020)；②绵阳－长宁克拉通裂陷烃源岩厚度等值线据赵路子等(2020)；③灯影组三＋四段剥蚀区范围据文龙等(2020)和刘静江等(2021)绘制。

图 4　扬子西缘绵阳－长宁克拉通裂陷烃源岩发育厚度与灯影期台缘带迁移叠合图

Fig. 4　The thickness of source rock in Mianyang-Changning craton rift on the west margin of Yangtze Block and the migration of Dengying platform

详细的情况是，资阳 1 井的灯影一＋二段对应为低伽玛、低密度、低锰、低硅的“四低”特征，磷反应微弱，且在灯影组一和二段界线附近出现已短暂的高锰和极低密度值。灯三段对应高伽玛、高密度、高硅、间歇性高锰特征，同时声波出现快速升高与高频震荡。灯四段对应为低伽玛、高密度、高硅及阶段性高锰特征。这一特征与该时期强烈构造伸展导致大量海底热液活动的地质背景一致，也是灯四段普遍发育硅质结核、硅质白云岩或硅质岩，及地层中锰(Mn)高含量的主要原因(贾伟等，2020；余文超等；2020)。麦地坪组对应的高伽玛、低密度、高磷是其最明显的标志，与该时期扬子西缘区域性成磷事件(刘宝珺等，1987)一致，如昆阳磷矿、什邡磷矿、镇雄磷矿和雷波磷矿等等。

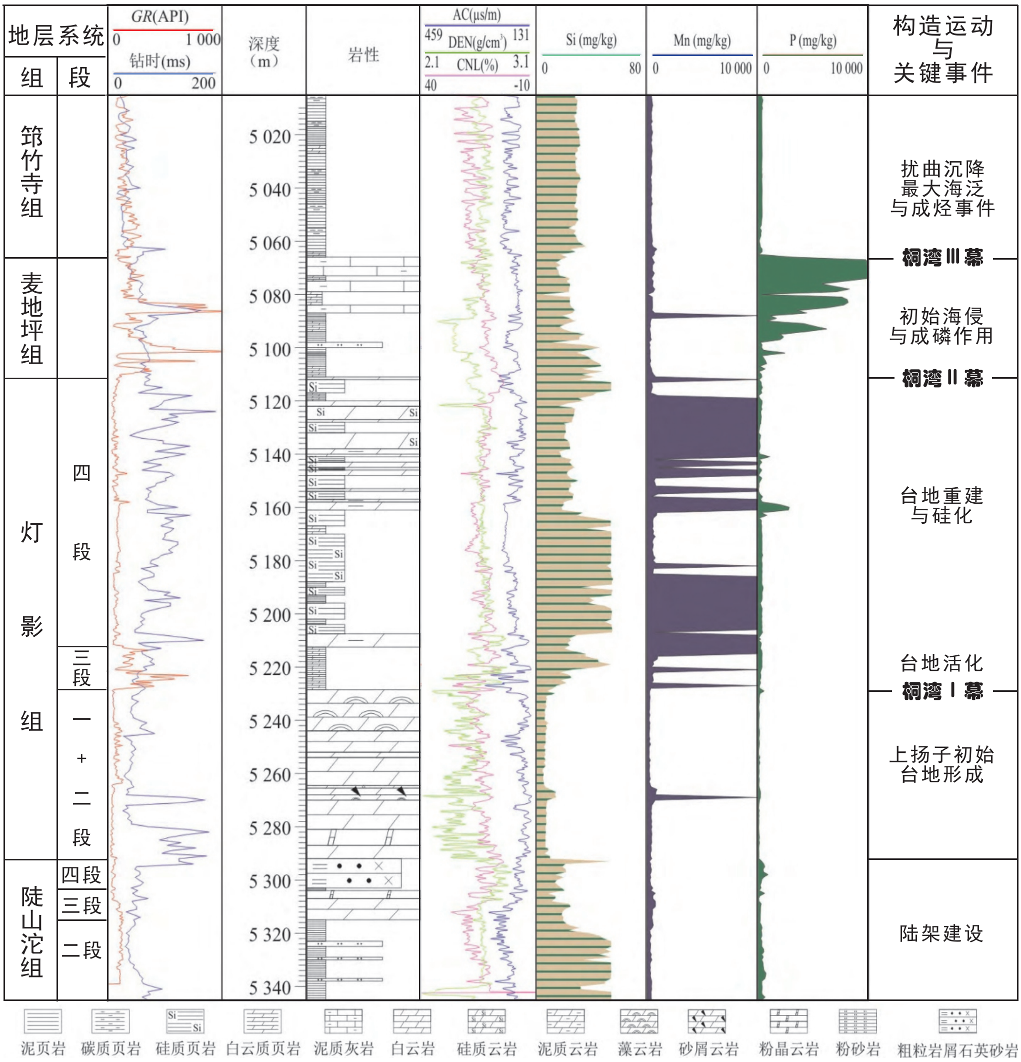


图5 资阳1井震旦—寒武纪转换期的沉积序列与关键事件(李双建等, 2018; 段金宝等, 2019)

Fig. 5 Sedimentary sequence and its key events in Sinian-Cambrian transition period of Ziyang 1 well (Modified from Li S J et al. (2018) and Duan J B et al. (2019))

对照资阳1井的地层划分,笔者对相关重点钻井测录井资料也进行了重新对比分析(表1),发现处于绵阳-长宁克拉通裂陷内的钻井,其地层序列均是完整的。在裂陷边缘(斜坡)的资4井和威基井甚至出现了麦地坪组沉积厚度的区域性高值,这也是符合沉积层序发育模式的。

通过上述典型剖面和钻井的地层划分与区域对比,我们发现扬子西北缘新元古代—早古生代经历了三次造山、三次伸展、三次海侵与一次雪球事件(图1)。三次造山依次是晋宁-四堡造山与褶皱基底的形成、泛非造山与绵阳-长宁克拉通裂陷的关闭及天井山-川中隆起的形成、加里东造山与扬子克拉通的陆内变形与改造;三次伸展依次是板溪早期的南华裂谷与双模式火山岩浆作用、晚震旦世的碳酸盐台地的活化与重建、中晚奥陶世的造山后垮塌与裂谷火山-岩浆作用;三次海侵依次是板溪期—震旦纪的持续海侵上超、早寒武世的快速海侵与成烃作用、中晚奥陶世的持续海侵上超。至于雪球地球事件,在扬子西北缘可能仅在摩天岭地块南北两侧保留部分冰期沉积,其他地区目前尚未发现相关沉积记录,可能主要表现大陆冰盖。

2 扬子西北缘泛非造山的沉积-构造记录

在讨论扬子东南缘泛非造山运动时,首先必须弄清楚泛非造山运动与华南加里东造山运动(或称之为广西运动)的先后关系及其地质表现。华南广西运动主要构造表现为泥盆系与下伏地层之间广泛

表 1　绵阳-长宁克拉通裂陷及周缘典型钻井地层划分表

Table 1　The stratigraphic division of typical wells from Mianyang-Changning craton rift and adjacent areas

钻井名称	灯 1+2 段/m	灯 3 段/m	灯 4 段/m	麦地坪组/m	筇竹寺组/m
资阳 1 井	61	16	114	40	496
高石 17 井	>5,未见底	52	46	48	520
自深 1 井	>182	6	39	91	385
窝深 1 井	925	25	112	54	330
资 4 井	>119,未见底	12	96	101	386
蓬探 1 井	603	11	28	16	554
角探 1 井	未揭示	未揭示	>353	23	352
高石 1 井	525	65	262	10	210
威基井	605	3	32	79	302
老龙 1 井	624	16	224	26	228
金石 1 井	未揭示	未揭示	>421	34	385
女基井	400	39	240	0	163

存在的不整合,其构造热事件的响应时限为 460～380Ma。徐亚军和杜远生(2018)研究认为,华南的加里东陆内造山作用是冈瓦纳泛非造山(550～480Ma)的构造应力向陆块内部传播,在具有弱流变学性质的南华盆地内聚集,导致早期沉积盆地发生构造反转的产物。

泛非造山运动是指因莫桑比克洋闭合,导致东、西冈瓦纳逐步碰撞拼合、形成冈瓦纳大陆的过程,其主幕发生于 600～550Ma 之间(陆松年,2004)。但在东冈瓦纳的南极洲和澳大利亚陆块上,相关的岩浆和变质作用年龄集中在 575～480Ma(姚金龙等,2021);在冈瓦纳北缘的印度北部和华南南部则主要在 520～470Ma(于津海等,2007;张爱梅等,2011),空间上存在一定时间差。华南南部的泛非造山作用,称之为郁南运动(吴浩若,2000;张爱梅等,2011;周恳恳等,2016),主要表现为云开地块和武夷地块上的寒武系与奥陶系及以上地层之间的区域不整合。

实际上,奥陶系底部与下伏寒武系及其以下地层的不整合,在冈瓦纳北缘的土耳其、伊朗、巴基斯

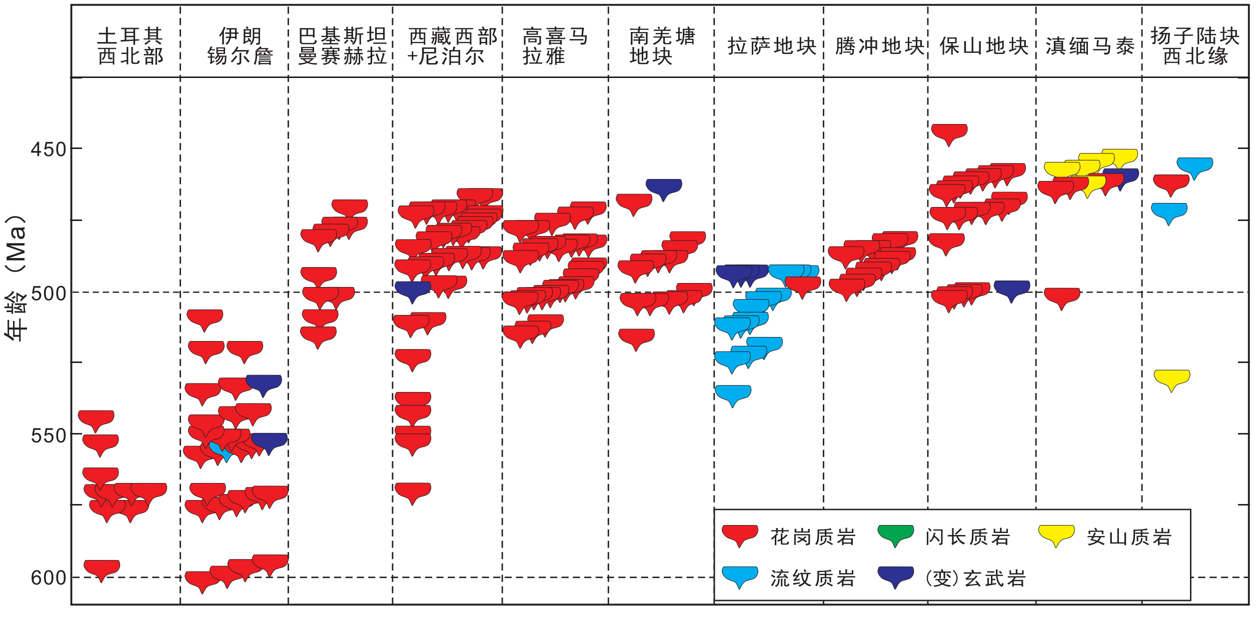


图 6　扬子西北缘和冈瓦纳北缘主要微陆块泛非期火山-岩浆作用(何世平等,2014;周云等,2021)

Fig. 6　Volcanic-magmatic age of northwestern Yangtze block and the main micro-continents along northern margin of Gondwana (Modified from He Shiping et al (2014) and Zhou Yun et al (2021))

坦、喜马拉雅、拉萨、羌塘、柴达木等陆块上广泛存在(Cawood et al., 2007;李才等, 2010;Wang Y J et al., 2013;Teng et al., 2020;周云等, 2021),其岩浆作用、变质作用的时限集中在520~460Ma(图6)。对比冈瓦纳北缘一系列陆块上的泛非运动构造响应,扬子西北缘不仅发育标志泛非造山过程的奥陶系与寒武系之间的不整合,更有一系列相关的构造-岩浆活动记录。

2.1 扬子西北缘震旦—寒武纪主要的火山-岩浆作用

2.1.1 早寒武世的火山-岩浆活动

前期区域调查表明,松潘-甘孜褶皱带的主要特征就是发育巨厚的志留系茂县群和中晚三叠世复理石沉积,后期又被大量的印支期花岗岩类侵入,而早古生代是否有同沉积火山岩鲜有报道。

位于松潘-甘孜褶皱带东部边缘的茂县渭门一带,出露震旦系灯影组、寒武系渭门组、奥陶系大河边组和志留系茂县群。1∶25万绵阳幅区域地查(2013)发现寒武系渭门组为一套巨厚的变质碎屑岩—火山岩系,主要岩性是绢云母石英片岩夹钙质砂岩、晶屑凝灰岩及透镜状火山质角砾岩、砾岩,角砾岩的砾石成分复杂,主要有流纹岩、石英斑岩、灰岩、变砂岩等。渭门组底部为炭质硅质板岩、炭质千枚岩,往上颜色逐渐变浅。白富正等(2015)对渭门组上部的晶屑凝灰岩进行了SHRIMP锆石U-Pb定年,获得了530.1±4.3 Ma年龄,表明在震旦—寒武纪构造转折期,扬子西缘经历一次重要的火山岩浆活动。

虽然该套火山岩的岩石组合及其大地构造背景目前尚不明确,但根据其区域背景及地质时代,推测应是在泛非造山背景下原特提斯洋初始俯冲的构造响应(姚金龙等, 2021),导致扬子西缘再次经历了构造活化与火山喷发事件。

值得注意的是,根据有关1∶5万区域地质调查报告资料,沿南坝—关庄—茶坝一线,发育有巨厚的下寒武统油坊沟组沉积凝灰岩、火山碎屑岩与岩屑(杂)砂岩的多韵律沉积,该套沉积-火山碎屑岩组合,应该与茂县渭门组沉积-火山碎屑岩具有相当的沉积-构造关联性与可对比性,也应是扬子西缘陆缘增生后之构造活化与弧后伸展的产物,有待进一步深入研究。

2.1.2 早中奥陶世的火山-岩浆活动

毛塔子组建于青川县酒家垭地区,该组出露于青川曲河—关庄—茶坝一带,岩石类型主要为变流纹岩、流纹质熔结凝灰岩、变流纹质熔结角砾岩、变英安质凝灰岩及变流纹质沉凝灰岩等。1∶20万广元幅将毛塔子组归属志留系,1∶5万关庄坝幅等区域地质调查(1993)和《四川省岩石地层》(1997)等将其归属为志留系茂县群。该套火山岩呈北东向不规则透镜状展布,其周围均为断裂或不整合超覆在寒武系、震旦系等不同层位之上。1∶25万广元幅区域地质调查(2013)在毛塔子组中酸性火山岩中获得SHRIMP锆石U-Pb年龄为467.3±3.8Ma,该年龄与李佐臣(2009)获得的SHRIMP锆石U-Pb年龄472.6±9.3Ma在误差范围内一致,确定该套火山岩时代为中奥陶世,遂重新启用毛塔子组,时代为中奥陶世。

同时,1∶5万青溪幅区域地质调查(1993)表明,在碧口地块南缘的青溪望乡台二长花岗岩中获锆石U-Pb等时线年龄为461±41/39Ma;耿元生等(2008)在宝兴黄店子获得黄店子组火山岩的锆石SHRIMP锆石U-Pb年龄为455±6Ma,与青川酒家垭毛塔子组酸性火山岩时代基本一致,均反映出扬子西缘在泛非造山后的构造伸展与火山岩浆事件(图6)。

2.2 扬子西北缘震旦—寒武纪主要的沉积-构造转换面

2.2.1 震旦—寒武纪沉积-构造转换与区域隆升

由于震旦—寒武纪的沉积-构造转换在灯影期碳酸盐台地相区普遍发育暴露侵蚀不整合面,对四川盆地储层评价与有利区带优选具有重要意义。为此,前人对此构造转换的沉积响应及其动力学机制作过较多研究和探讨(于炳松等, 2002;江永宏等, 2005;杨瑞东等, 2005;汪建国等, 2007;卓皆文等, 2009;朱日祥等, 2009;汪正江等, 2011;李伟等, 2015),该沉积-构造转换有人认为不仅是一次重要的泛克拉通事件、更是一个全球性构造(岩石圈快速伸展)事件(于炳松等, 2002),有认为是华南裂谷盆地向被动大陆边缘阶段转换的响应(汪正江等, 2011),有认为是桐湾升降运动和兴凯地裂运动联合作用的产物(李伟等, 2015),等等。

然而,根据近期作者对扬子西北缘的调查,结合上述相关泛非沉积-火山岩浆记录的综合分析,我们更倾向于认为,扬子克拉通震旦—寒武纪沉积-构造转换的盆地动力学来自泛非造山的板块俯冲与弧后扩张作用。相应的岩浆弧就在渭门—南

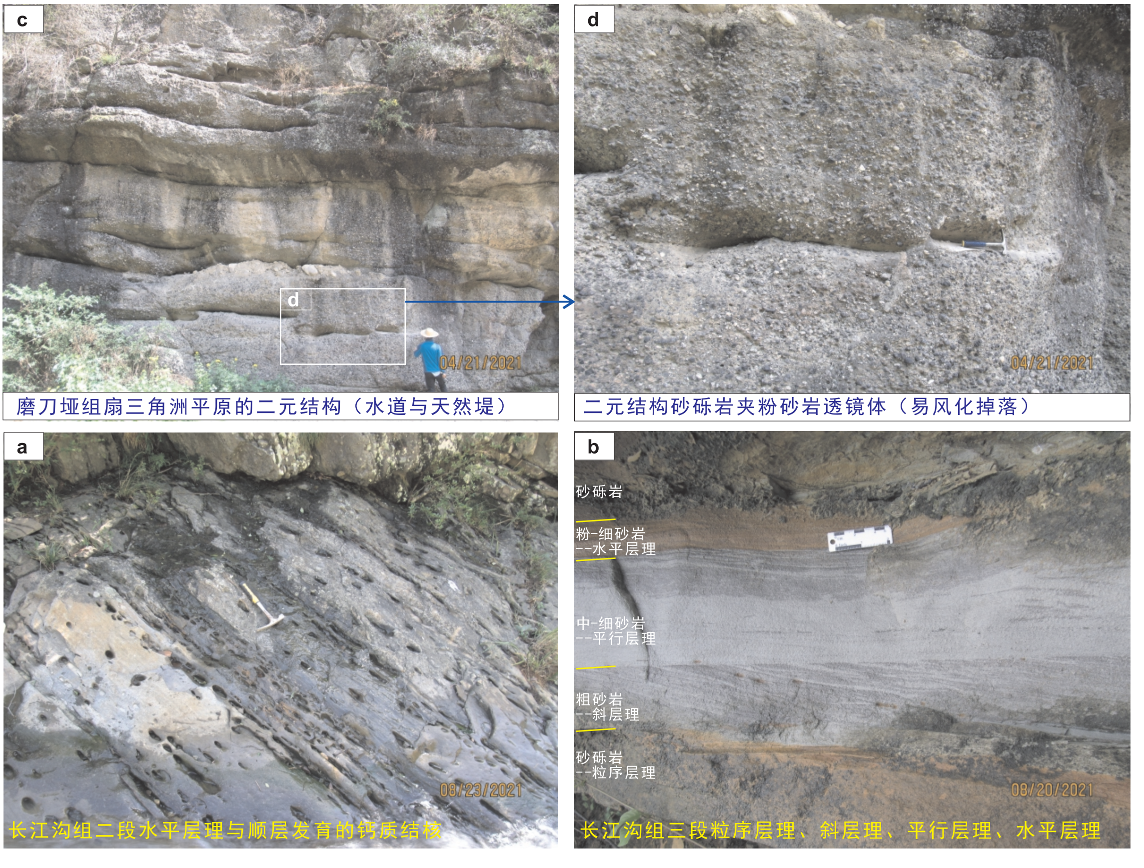
坝—关庄—茶坝一带(白富正等，2015)，对应于早寒武世早期邱家河组—油坊沟组巨厚的沉积－火山碎屑岩序列。而扬子克拉通西缘灯影晚期和麦地坪期的沉积火山岩记录也时有报道，如昆明梅树村剖面(朱日祥等，2009)、峨边先锋剖面(邓胜徽等，2015;资金平等，2017)等。在四川盆地内部的钻井上，也有相应的沉积记录，如金石 1 井、资 4 井、高石 17 井等麦地坪组底部发育碎屑流沉积(刘树根等，2018)，揭示出灯影晚期的隆升剥蚀与麦地坪早期的低位楔进积作用。

2.2.2　早寒武世晚期的强烈隆升与快速充填

扬子西北缘早寒武世晚期的强烈隆升与剥蚀的重要证据，就是龙门山构造带及米仓山地区普遍发育的沧浪铺期巨厚的多韵律砂泥岩－含砾粗砂岩－砂砾岩组合。虽在不同构造单元其沉积序列稍有不同(青川—平武—朝天地区为邱家河组＋油坊沟组、天井山地区称为长江沟组＋磨刀垭组、米仓山地区为郭家坝组(相当于筇竹寺组＋仙女洞组＋阎王编组)、或宁强地区称之为石牌组等)，但总体趋势都是由欠补偿/饥饿沉积向补偿、超补偿沉积转换(图 1)，区域上大体可对比的序列演化是:炭质泥页岩、炭硅质板岩→→钙质砂质板岩、灰岩夹鲕粒灰岩→→粉—细砂岩、砂质泥页岩夹泥质/泥晶灰岩→→杂砂岩、含砾砂岩和硅质砂砾岩组合(图 7)，特别是在广元东溪河剖面筇竹寺组底部发育厚达 30 余米的含滑塌岩块和硅质砾岩透镜体的浅灰色粉砂质岩与深水炭质、硅质页岩韵律互层沉积(图 3a)，显示出西缘碰撞造山、快速隆升剥蚀与造山带前缘的快速充填、进积的过程。至沧浪铺晚期，绵阳－长宁裂陷槽已被快速充填、并迅速折返隆升，天井山隆起形成、定型，此后与川中古隆起同步演化。

2.2.3　奥陶系与下伏地层普遍存在不整合接触关系

根据区域调查资料，扬子西缘从南部的盐源－宁蒗盆地，中部的康定—宝兴地区，到北部的龙门山



a. 青川白家松盖坝长江沟组二段钙质粉砂－细砂岩;b. 青川竹园天井山背斜长江沟组三段三角洲前缘水道沉积，斜层理古流向为 SE115°;c-d. 广元三堆康家沟磨刀垭组扇三角洲二元结构(分流河道砂砾岩夹河漫滩粉砂岩透镜体)

图 7　扬子西北缘泛非造山的沉积响应与沉积序列演化

Fig. 7　Sedimentary response and deposition sequence evolution of the pan-African Orogeny on the northwest edge of the Yangtze Block

地区和米仓山地区(图 8),奥陶系与下伏地层普遍存在沉积间断和不整合(何登发等, 2019, 2020),甚至是中上奥陶统直接与灯影组不整合接触(1∶25 万宝兴幅),或灯影组直接与志留系茂县群不整合接触(1∶25 万绵阳幅、广元幅、平武幅等)。由此可见,扬子西缘泛非造山的隆升、剥蚀强度与范围是清楚和明显的。这一特征与冈瓦纳北缘的拉萨陆块、羌塘地块、保山地块等一系列微陆块上普遍存在的奥陶系与下伏地层之间不整合基本一致(李才等, 2010;董春燕等, 2011;黄勇等, 2012)。

泛非造山运动是继新元古代中期 Rodinia 超大陆裂解后,东、西冈瓦纳大陆再次汇聚的构造响应,其形成时限约在 620 ~ 500Ma (Cawood et al., 2021)。上述地质调查、勘探实践均表明,泛非运动在扬子西缘的沉积 – 构造响应是明显的。可以肯定,扬子陆块与羌塘、拉萨等陆块一样,也是冈瓦纳大陆北缘印度 – 澳大利亚周缘造山带的一部分(图 9),即扬子陆块参与并见证了冈瓦纳古大陆的聚散过程。然而遗憾的是,截至目前尚未见有相关文献报道过扬子西缘泛非运动对四川盆地深层地质结构形成演化的制约性研究,特别是在泛非运动背景下,重建摩天岭地块与扬子陆块的碰撞、拼合过程及其对绵阳 – 长宁克拉通裂陷的充填消亡、天井山隆起形成演化的动力学过程,不仅是认识四川盆地深层地质结构的重要窗口,更是探索深层油气勘探新领域的重要抓手。

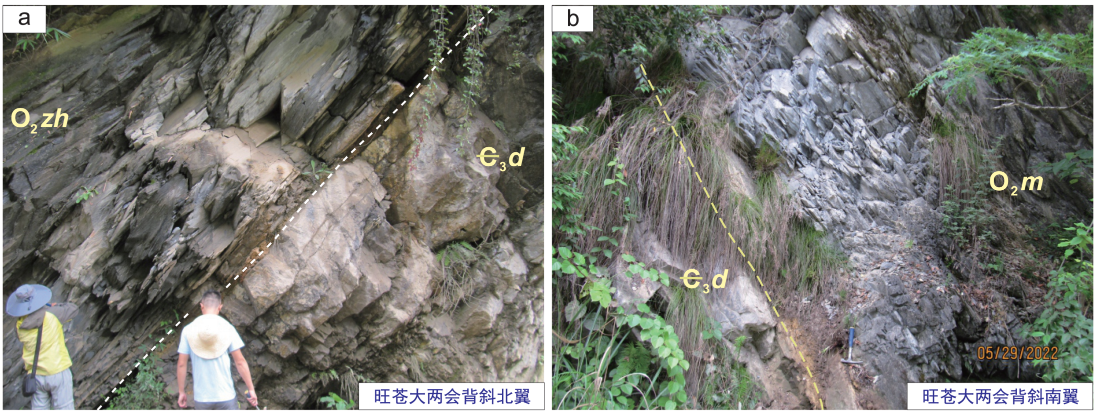


图 8　旺苍大两会背斜南北两侧寒武—奥陶系不整合接触关系

Fig. 8　The parallel unconformity between Cambrian and Ordovician for the two sessions of the north and south wings of Dalianghui conticline, Wangcang county

3　绵阳 – 长宁克拉通裂陷的开启与沉积充填过程

关于绵阳 – 长宁克拉通裂陷的开启时间,前人基于地震剖面解释和部分深层钻井做了大量研究工作,但结论却不尽相同。有研究者认为裂陷槽是始于前震旦纪、灯影中晚期进一步发展(邹才能等, 2014;魏国齐等, 2015b;杜金虎等, 2016;汪泽成等, 2020),有认为是裂陷槽早寒武世才打开并被快速充填的(刘树根等, 2013, 2016;李伟等, 2015);也有对此持否定态度并认为是灯影期末古岩溶侵蚀槽的(杨雨等, 2014;周慧等, 2015),或认为是地幔柱隆升剥蚀与塌陷沉降的产物(刘静江等, 2021)。

然而,盆内实钻和地震解释均证实灯二段沉积期和灯四段沉积期都发育有与裂陷深水沉积(主要为欠补偿沉积)相对应的台缘丘滩相的(图 10)(邹才能等, 2014;魏国齐等, 2015a, b;杜金虎等, 2016;周进高等, 2017;赵路子等, 2020;赵文智等, 2020)。例如高科 1 井、高石 1 井、磨溪 9 井、磨溪 12 井、磨溪 52 井、磨溪 108 井等灯影组台缘带具有与常规台缘丘滩体相似的地震相和沉积特征(魏国齐等, 2015b;杜金虎等, 2016;汪泽成等, 2020)。因此,绵阳 – 长宁克拉通裂陷的形成演化不仅成就了灯影期的台 – 盆相间的古地理格局,也制约了台缘丘滩相储集层的发育和展布(杜金虎等, 2016;周进高等, 2017)。

向北沿绵阳 – 长宁裂陷槽东侧台缘带的盐亭、阆中等地区,蓬探 1 井更是在灯影组二段台缘丘滩相获得了新的重大勘探发现(赵路子等, 2020)。蓬深 1 井、角探 1 井、川深 1 井等岩心和岩屑揭示的灯四段台缘丘滩相信息与地震剖面获取的地震相反射特征(图 10)一致。而克拉通裂陷内的地震反射

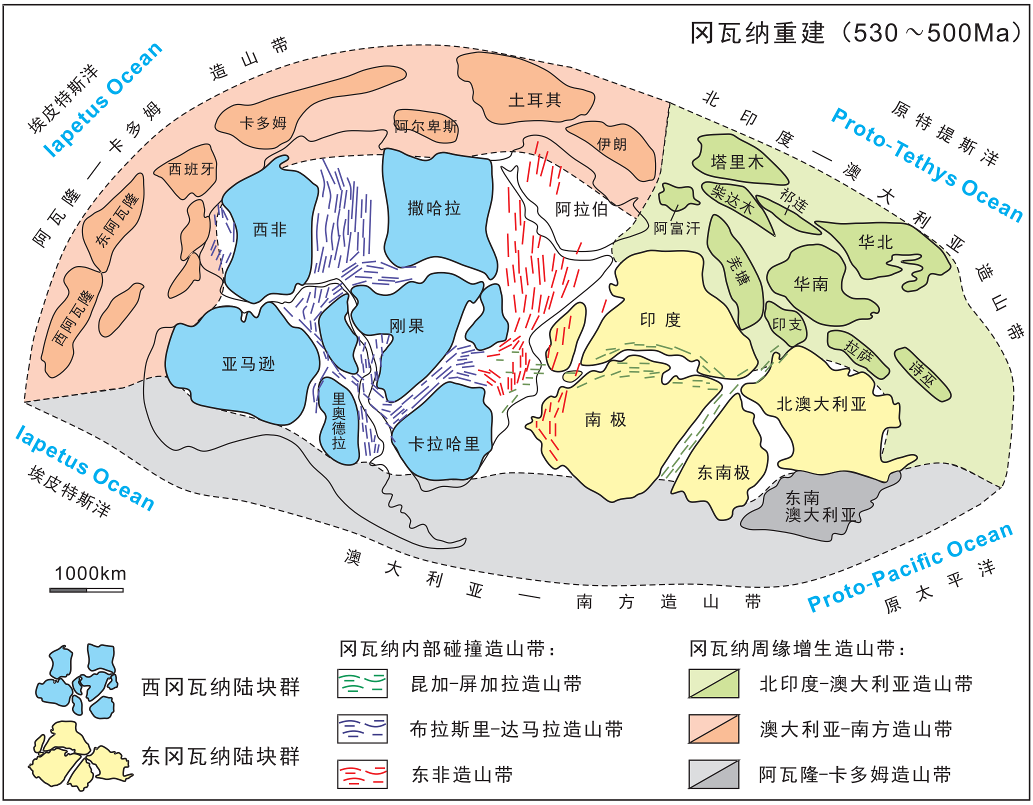


图 9　冈瓦纳超大陆的主要造山带与华南陆块的可能构造位置

Fig. 9　The main orogen of the Gondwana supercontinent and the possible tectonic location of South China(modified from Cawood P A et al. (2020) and Yao Jin-long et al. (2021))

剖面识别不出灯三、灯四段地层,并非是没有沉积或被剥蚀,而是地震相的识别精度问题。根据最新钻井资料分析,裂陷内灯三、灯四段均有发育,只是发生了相变,沉积厚度小,且变成了泥质云岩、碳硅质岩、硅质白云岩组合,被误划入麦地坪组之中了(李双建等, 2018)。

据此,结合近期的扬子西北缘地质调查进展,我们系统重塑了绵阳 - 长宁克拉通裂陷的形成演化过程及其与四川盆地川中 - 天井山隆起的动力学成生关联性。

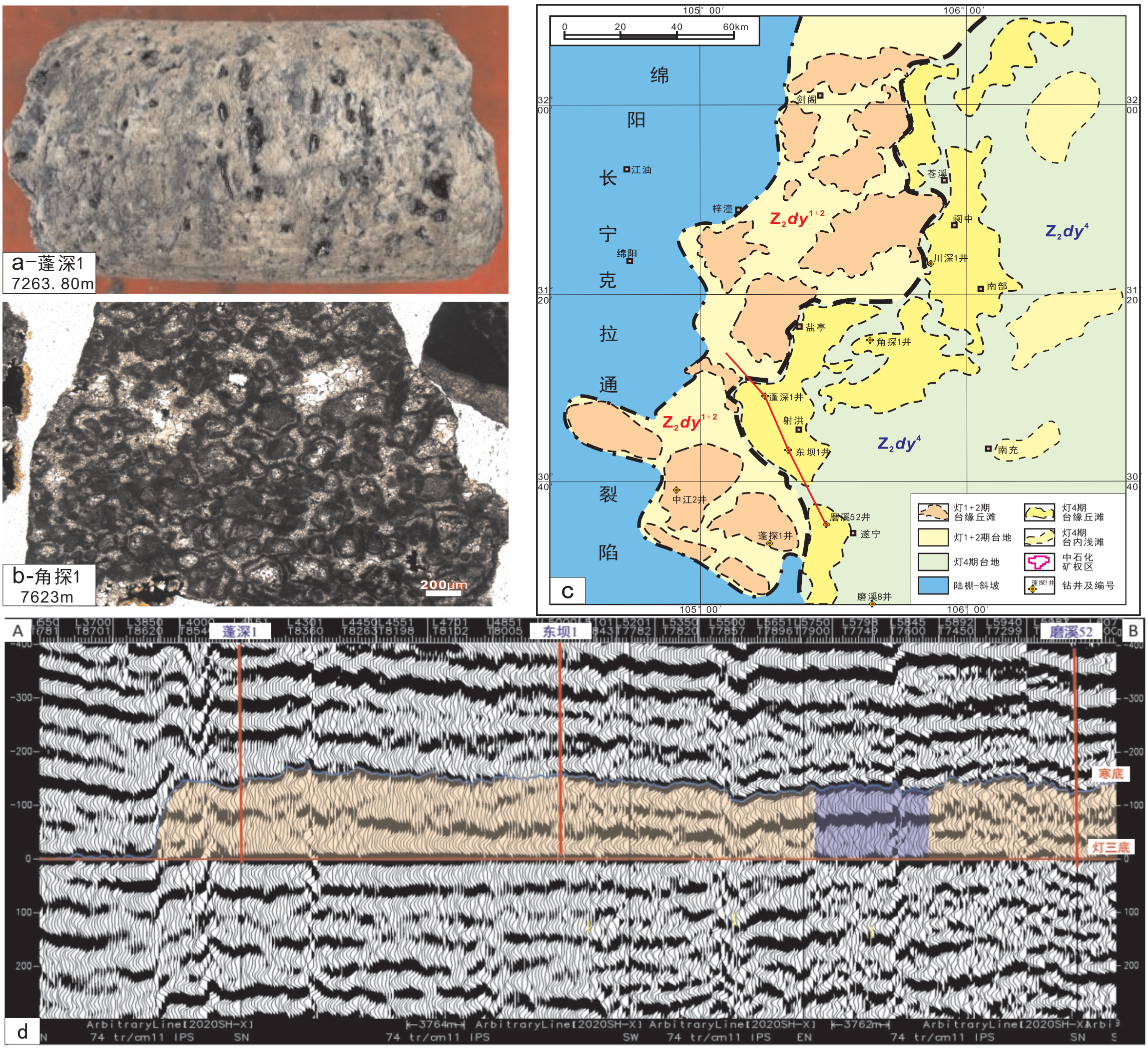
3.1　绵阳 - 长宁克拉通裂陷的开启与克拉通边缘的快速沉降

陡山沱期为克拉通边缘裂陷初期,其主要表现为克拉通边缘的快速沉降与充填(图 11A)。轿子顶地区的碓窝梁组及其相当层位地层是绵阳 - 长宁克拉通边缘裂陷的第一套沉积。随着裂陷的进一步发展,可容纳空间的快速增加与地形 - 地貌差异的扩大,为似复理石组合的胡家寨组的快速充填创造了条件。至胡家寨组沉积晚期,随着物源区的夷平和海平面的持续上升,出现了深水陆棚或盆地相炭质泥页岩沉积(相当于陡山沱组四段沉积期)。

关于绵阳 - 长宁克拉通边缘裂陷开启的地球动力学机制,可能有二:其一可能是与松潘 - 甘孜地块相连的洋壳向扬子克拉通之下的俯冲,导致克拉通的边缘伸展裂陷;其二是 Rodinia 超大陆的被动大陆边缘持续扩张。但从扬子西缘震旦—寒武纪构造转换的一系列沉积 - 火山 - 岩浆活动的响应看,洋壳俯冲与弧后伸展的大地构造模式的可能性更大些,也与扬子西缘寒武纪早期开始的泛非造山的构造应力背景一脉相承。

3.2　绵阳 - 长宁克拉通裂陷的发展与碳酸盐台地的补偿性生长

灯影早期,随着区域性物源补给的相对匮乏和海平面的持续上升,为上扬子克拉通碳酸盐台地的发展创造了条件,而克拉通边缘裂陷的持续沉降更是为碳酸盐台地的补偿性生长提供了可能。在裂陷边缘,如窝深 1 井、老龙 1 井、蓬探 1 井等发育厚达 600 ~ 1000m 的藻白云岩(表 1,图 11B),而在裂陷槽内灯影早期(Z_2dy^{1+2})沉积却不大,如资阳 1 井灯影组一 + 二段仅厚 50 余米。这里反映出两个重



a. 蓬深1井灯四段藻凝块云岩(岩心);b. 角探1井灯四段亮晶藻砂屑云岩(岩屑);c. 绵阳-长宁裂陷槽东侧灯影早期(1+2段)和灯影晚期(4段)沉积相叠合图,四段沉积期台缘带向东有较大迁移;d. 过蓬深1-东坝1-磨溪52井地震解释剖面,灯四段块状丘滩体的地震响应为上强下弱/单强断续波峰(褐色部分)

图10 绵阳-长宁克拉通裂陷东北台缘丘滩沉积及其地震相特征

Fig. 10 Reef-shoal deposition and its seismic facies characteristics of Mianyang-Changning craton rift

要的沉积-构造背景:一是台地相区生物丘滩的持续加积与海平面的持续上升的动态平衡;二是裂陷槽内的台盆相区则表现出水体持续加深的欠补偿/饥饿环境,且越往克拉通裂陷的沉降中心,两者的沉积相分异越大。

3.3 绵阳-长宁克拉通裂陷的扩展、碳酸盐台地的活化与重建

随着来自西缘洋壳俯冲的持续推进,克拉通边缘裂陷也进一步向克拉通内扩展(南至长宁、宜宾地区,但是否延伸至滇东北,尚待进一步研究),绵阳-长宁克拉通裂陷正式成型。同时弧后伸展也伴随有零星火山岩浆活动(如灯三段的凝灰岩沉积;邓胜徽等, 2015)和海底热液活动。这一系列的构造活动导致了上扬子碳酸盐台地的活化(图11C),随后的灯四段碳酸盐台地的发育相对灯影早期来说发育厚度和范围均有减小(图11D),且伴随有大量的硅质沉积(硅质岩、硅质白云岩、硅质结核等)。

这一阶段的沉积分异仍是明显的。在台盆相区,灯三段主要为炭质硅质岩、硅质页岩夹炭质页岩;灯四段为泥质云岩、硅质泥晶云岩夹泥页岩等。台地相区灯三段主要为凝灰质黏土岩、砂质泥岩等,灯四段台地得到重建,发育藻砂屑云岩、藻凝块云岩、夹硅质岩、硅质云岩等。但对比灯一+二段沉积期,台缘带向台内有较大的迁移,反映出该时期的绵阳-长宁克拉通边缘裂陷仍处于持续沉降

期,且台缘带后退后补偿性生长得到延续(图 12)。与台缘带对应的裂陷内(台盆相区),水体始终较深,沉积厚度小,仍以薄层硅质云岩、泥云岩为主(图 11D)。

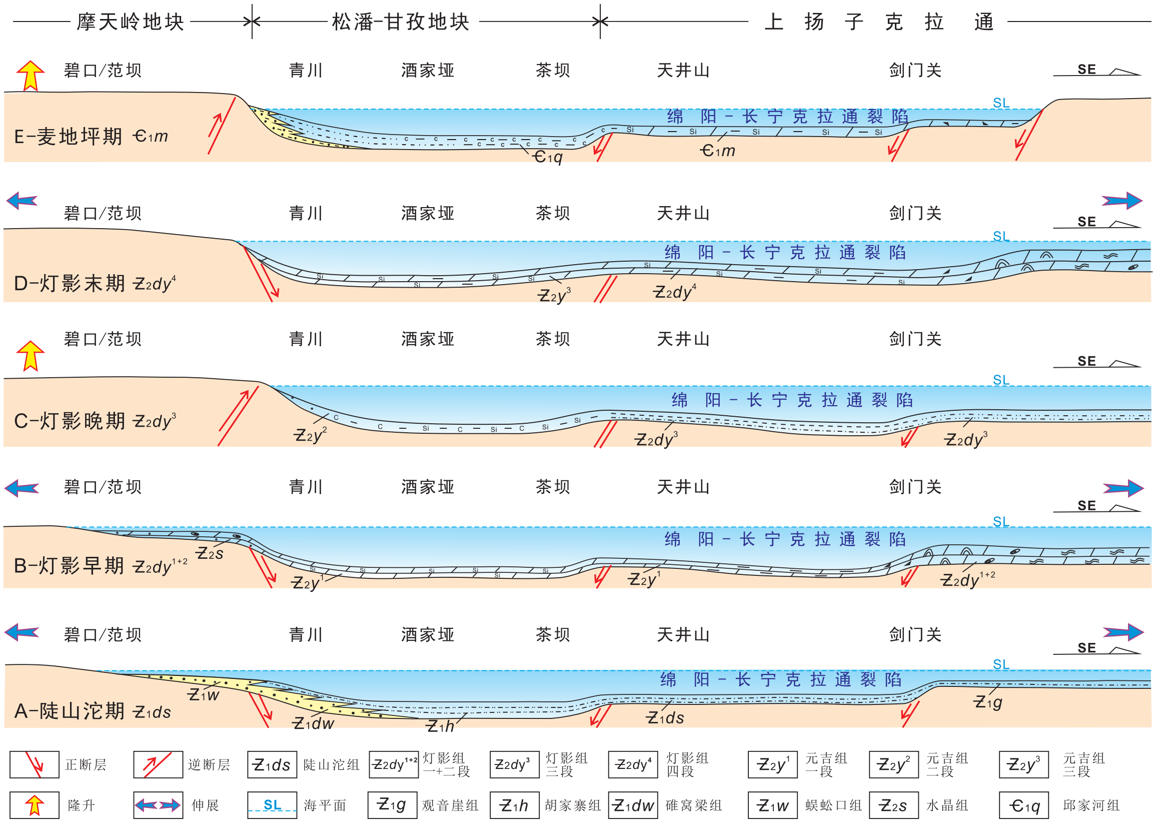


图 11　绵阳－长宁克拉通边缘裂陷的形成与发展(震旦纪)

Fig. 11　Onset and development of Mianyang-Changning craton margin rift (Sinian)

3.4　克拉通碳酸盐台地的隆升与风化剥蚀

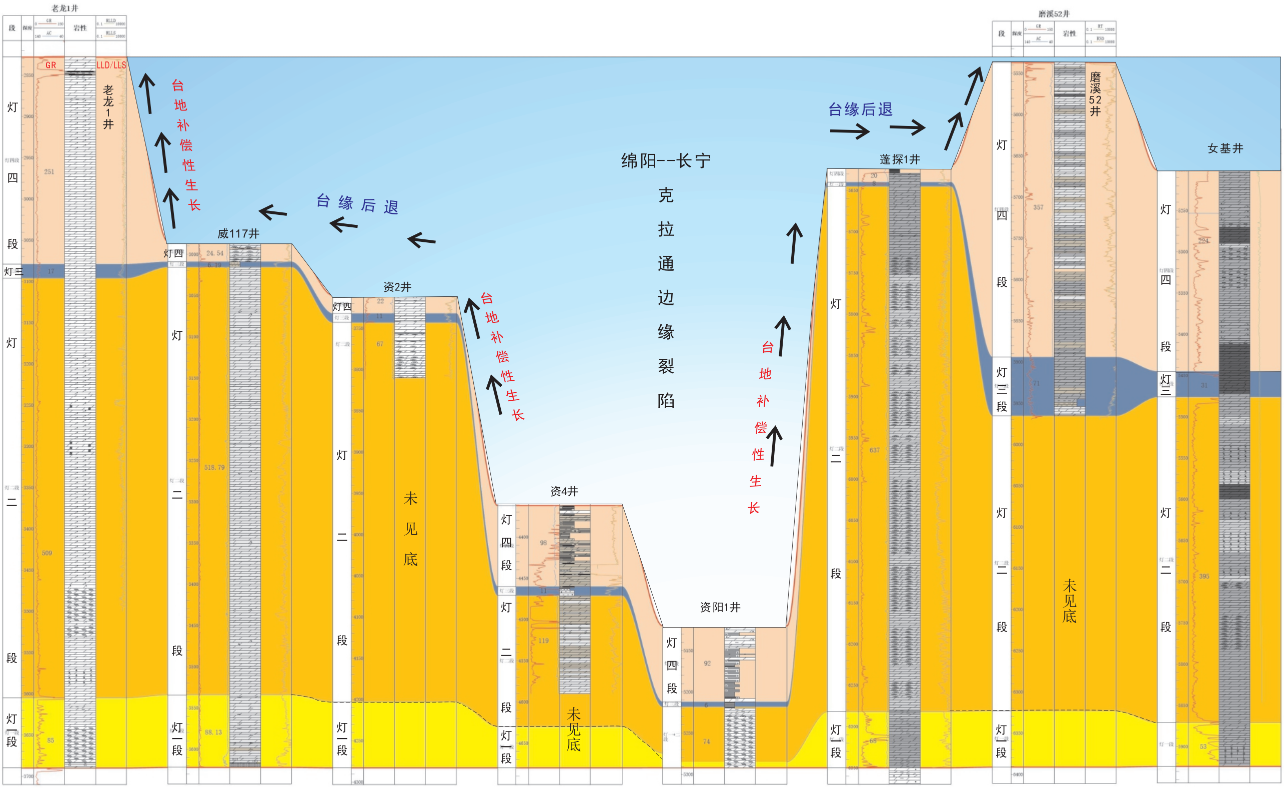
灯影期末—麦地坪早期,可能是扬子西缘的洋壳俯冲向弧陆碰撞转换,伸展构造背景也快速转换为挤压环境,上扬子碳酸盐台地全面隆升,而处于风化剥蚀的状态。该时期的沉积,主要集中在克拉通裂陷的相对深水区(图 11E)及部分喀斯特岩溶盆地之中。

3.5　克拉通边缘的挠曲沉降与碳酸盐台地的淹没

筇竹寺期,可能是摩天岭地块持续向东、向南碰撞拼贴,松潘－甘孜地块东段和扬子陆块的西北缘发生快速挠曲沉降,灯影期发育的碳酸盐台地、麦地坪期发育的古岩溶地貌被快速海侵所淹没。筇竹寺早期是扬子西缘重要的构造应力场转换期(伸展向挤压转变)。挠曲沉降初期,因构造掀斜作用,导致局部海平面快速上升,物源补给相对匮乏,为优质的烃源岩沉积(筇竹寺组下段)发育创造了构造条件,当然也有该期最大海泛导致区域性海平面上升的叠加效应。至筇竹寺晚期,随着弧陆碰撞的加剧和摩天岭地块的快速隆升与剥蚀,物源充沛,绵阳－长宁克拉通边缘裂陷进入了快速充填阶段。该阶段由于物源区相对较远,且主要来自沉积成岩不久的震旦系地层的再旋回作用,因此,筇竹寺组上段砂岩不多,仍以泥质岩为主夹同沉积火山碎屑岩。

该阶段的动力学机制可能主要是弧陆碰撞,因此,伴随着较强烈的火山－岩浆活动(张俊明等,1997;朱日祥等,2009;白富正等,2015)(图 13A)。

需要提及的是,在弧陆碰撞之后、强烈的陆陆碰撞之前,出现一个相对平静期,陆源碎屑补给较少,为上扬子克拉通台地生物丘、砂屑－鲕粒滩的发育提供了短暂的相对清澈的海水环境。在米仓山前缘称之为仙女洞组,天井山地区相当于长江沟组二段的浅水陆棚含钙质结核/条带的粉细砂岩夹前三角洲席状砂沉积,在黔北则对应于明心寺组中段的古杯礁灰岩段。



(老龙 1 井—威 117 井—资 2 井—资 4 井—资阳 1 井—蓬探 1 井—磨溪 52 井—女基井灯影组柱状对比图)
(上述灯影组三、四段的划分主要依据测井相和部分岩心、岩屑等资料的综合分析)

图 12 扬子西缘灯影期碳酸盐台地补偿性生长与后退加积发育模式

Fig. 12 Development model of compensatory growth and backward aggradation of carbonate platform on the western margin of Yangtze craton

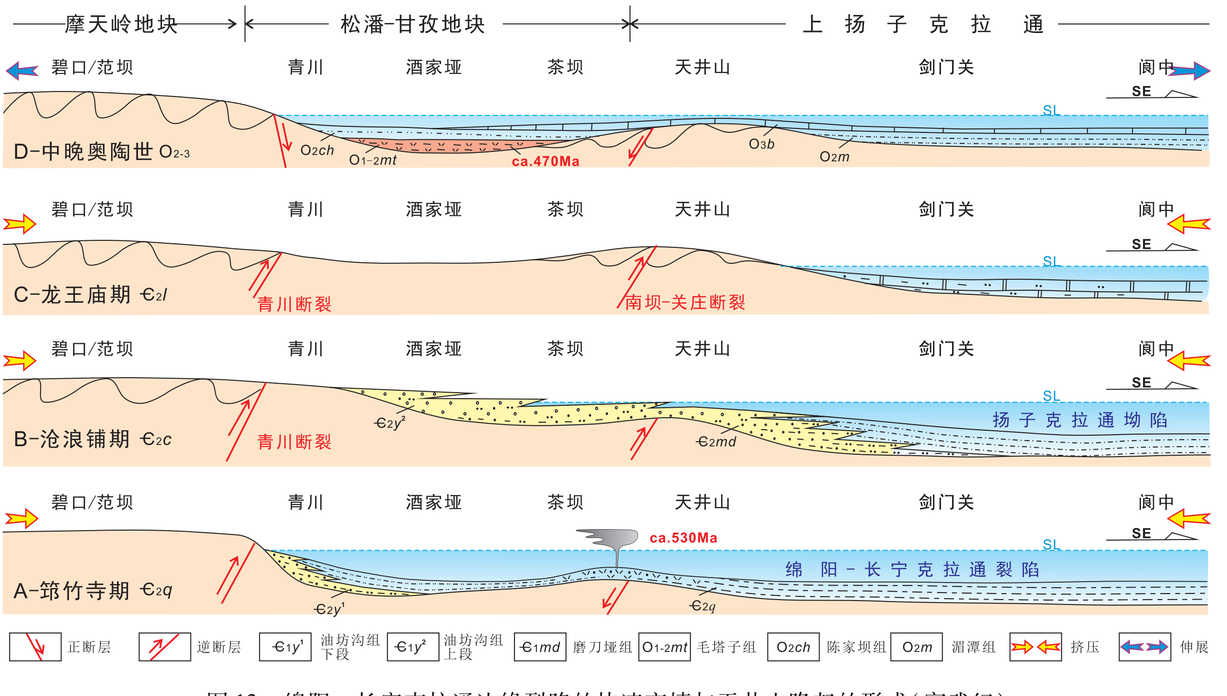


图 13 绵阳－长宁克拉通边缘裂陷的快速充填与天井山隆起的形成(寒武纪)

Fig. 13 Rapid filling of Mianyang-Changning craton margin rift and the formation of Tianjingshan uplift (Cambrian)

3.6　碰撞造山、克拉通边缘裂陷的快速充填与折返隆升

沧浪铺期为陆陆碰撞造山与克拉通边缘裂陷的快速充填阶段。该阶段对应的沉积序列,在米仓山前缘主要为沧浪铺组(或阎王编组),在天井山地区为长江沟组三段三角洲前缘砂体和磨刀垭组扇三角洲平原砂砾岩。特别是沧浪铺晚期在天井山－米仓山西缘,发育一套向上粒度变粗(细砂岩→中粗砂岩→砂砾岩→硅质细砾岩)、砂岩层厚递增的厚层—块状砂岩→硅质砂砾岩(图 7)的进积序列(图 13B),是碰撞造山的典型沉积标志。至沧浪铺期末,绵阳－长宁克拉通边缘裂陷已结束充填,并快速反转成为天井山隆起,其上普遍缺失寒武纪龙王庙期至早奥陶世沉积序列,而直接被中晚奥陶世沉积超覆(图 1,图 13c, d)。

而上扬子西北缘奥陶纪的沉积上超,始于早—中奥陶世的板内伸展与裂谷火山作用(李佐臣,2009),发育毛塔子组晶屑凝灰岩、流纹岩或流纹质英安岩组合(图 13d),应为泛非造山后的应力松弛、造山带垮塌的产物。

4　主要认识与结论

绵阳－长宁克拉通边缘裂陷的发现及其深层油气勘探的重大突破,开辟了油气勘探的新领域,也开启了四川盆地早期沉积演化研究的新阶段。但对于四川盆地深层原型盆地的成生及其沉积－构造演化过程的重塑,却是一个艰难的长期探索与认知过程。

本文在详细的地质调查与盆内典型钻井、地震资料的分析对比基础上,对比全球冈瓦纳大陆汇聚与泛非造山过程,系统厘定了泛非运动在扬子西缘的沉积－构造－岩浆作用记录,明确指出扬子陆块为新元古代末期冈瓦纳大陆的一部分。同时,结合盆内最新深层钻井和二维地震资料解析,研究认为绵阳－长宁克拉通边缘裂陷的成生、发展、充填与折返隆升的过程主要受控于扬子西缘的泛非期的洋壳俯冲、弧后伸展、弧陆碰撞与陆陆碰撞造山等一系列构造作用。因此,本文对扬子西缘克拉通裂陷盆地动力学的重塑,不仅为华南板块在冈瓦纳古大陆重建中的构造定位提供了新资料,亦将对探索四川盆地深层油气勘探新领域、新方向具有重要的启示意义。

致谢:本文在成文过程中曾与西南石油大学地球科学与技术学院彭军教授进行过有益的讨论;部分野外调查得到了成都地质调查中心何江林高级工程师的大力支持;侯乾博士后、夏彧博士、周放硕士、张青松硕士、王牧源硕士参与了部分野外调查,在此一并表示衷心感谢!

参考文献(References):

Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A, 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly [J]. Earth and Planetary Science Letters, 255(1－2): 70－84.

Cawood P A, Martin E L, Murphy J B, et al., 2021. Gondwana's interlinked peripheral orogens [J]. Earth and Planetary Science Letters, 568: 117057. https://doi. org/10. 1016/j. epsl. 2021.117057

Gao F, Pei X Z, Li R B, et al., 2020. Further constraints on a Neoproterozoic active continental margin from sandstones of the Hengdan Group in the Bikou Terrane, northwestern margin of the Yangtze Block, South China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 203:104514. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104514

Li J Y, Wang X L, Gu Z D, 2018. Early Neoproterozoic arc magmatism of the Tongmuliang Group on the northwestern margin of the Yangtze Block: Implications for Rodinia assembly [J]. Precambrian Research, 309:181－197.

Teng X, Zhang J, Mao X H, et al., 2020. The earliest Cambrian UHT metamorphism in the Qaidam block, western China: A record of the final assembly of Greater Gondwana? [J]. Gondwana Research, 87:118－137.

Wang X C, Li X H, Li W X, et al., 2008. The Bikou basalts in the northwestern Yangtze block, South China: Remnants of 820－810 Ma continental flood basalts? [J]. Geological Soceity of American Bulletin, 120:1478－1492.

Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al., 2013. Origin of Paleosubduction-modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence [J]. Lithos, 160－161: 37－54.

Wu P, Zhang S B, Zheng Y F, et al., 2019. Amalgamation of South China into Rodinia during the Grenvillian accretionary orogeny: Geochemical evidence from Early Neoproterozoic igneous rocks in the northern margin of the South China Block [J]. Precambrian Research, 321:221－243.

Xiao L, Zhang H F, Ni P Z, et al., 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution [J]. Precambrian Research, 154:221－235.

Yan Q R, Hanson A D, Wang Z Q, et al., 2004. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze Plate, China: Implications for Rodinia Reconstruction [J]. International Geology Review, 46:817－832.

白富正,王一伟,罗绍强,等, 2015. 四川茂县渭门组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及地质意义[J]. 高校地质学报,21(1):163 -167.

邓胜徽,樊茹,李鑫,等, 2015. 四川盆地及周缘地区震旦(埃迪卡拉)系划分与对比[J]. 地层学杂志,39(3):239 -254.

董春艳,李才,万渝生,等, 2011. 西藏羌塘龙木错 - 双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式:构造归属及物源区制约[J]. 中国科学:地球科学,41(3):299 -308.

杜金虎,汪泽成,邹才能,等, 2016. 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, 37(1):1 -16.

段金宝,梅庆华,李毕松, 2019. 四川盆地震旦纪 - 早寒武世构造 - 沉积演化过程[J]. 地球科学,44(3):738 -755.

耿元生,杨崇辉,王新社,等, 2008. 扬子地台西缘变质基底演化[M]. 北京:地质出版社:1 -215.

何登发,李英强,黄涵宇,等, 2020. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集[M]. 北京:科学出版社:1 -568.

何登发,伍顺, 2019. 天井山古隆起的"前世今生":论古隆起的构造复原[J]. 地学前缘,26(1):086 -101.

何世平,李荣社,王超,等, 2014. 青藏高原及邻区前寒武纪地质[M]. 北京:中国地质大学出版社:1 -280.

黄勇,郝家栩,白龙,等, 2012. 滇西施甸地区晚泛非运动的地层学和岩石学响应[J]. 地质通报,31(2/3):306 -313.

贾伟,陈翠华,张自贤,等, 2020. 重庆高燕锰矿床成矿物质来源及沉积环境. 科学技术与工程,20(5):1724 -1733.

江永宏, 李胜荣, 2005. 湘、黔地区前寒武—寒武纪过渡时期硅质岩生成环境研究[J]. 地学前缘,12(4):622 -629.

赖绍聪,李永飞,秦江锋, 2007. 碧口群西段董家河蛇绿岩地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 中国科学:地球科学,37(增刊):262 -270.

李才,吴彦旺,王明,等, 2010. 青藏高原泛非—早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现[J]. 地质通报,29(12):1734 -1736.

李双建,高平,黄博宇,等, 2018. 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,39(5):889 -898.

李伟,刘静江,邓胜徽,等, 2015. 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,36(5):546 -556.

李智武,冉波,肖斌,等, 2019. 四川盆地北缘震旦纪—早寒武世隆 -坳格局及其油气勘探意义[J]. 地学前缘,26(1):60 -85.

李佐臣, 2009. 扬子地块西北缘后龙门山造山带(北段)物质组成、构造特征及其形成演化[D]. 西安:长安大学.

刘宝珺,许效松、罗安屏,等,1987. 中国扬子地台西缘寒武纪风暴事件与磷矿沉积[J]. 沉积学报,5(3):28 -39.

刘静江,李伟,张宝民,等, 2015. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报,17(6):735 -753.

刘静江, 刘慧荣, 李文皓, 等, 2021. 四川盆地裂陷槽研究新进展——关于裂陷槽成因机制与形成时间的探讨[J]. 地质论评, 67(3):767 -786.

刘树根,刘殊,孙玮,等, 2018. 绵阳—长宁拉张槽北段构造 - 沉积特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),45(1):1 -13.

刘树根,孙玮,罗志立,等, 2013. 兴凯地裂运动与四川盆地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),40(5):511 -520.

刘树根,王一刚,孙玮,等, 2016. 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),43(1):1 -23.

陆松年, 2004. 初论"泛华夏造山作用"与加里东和泛非造山作用的对比[J]. 地质通报,23(9/10):952 -958.

梅庆华,何登发,桂宝玲,等, 2016. 川中地区新元古代—古生代初多幕裂陷过程及其演化[J]. 天然气地球科学,27(8):1427 -1438.

裴先治,李佐臣,丁仨平,等, 2009. 扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩:锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义[J]. 地学前缘,16(3):231 -249.

平先权,郑建平,熊庆,等, 2014. 扬子西北缘碧口块体花岗质岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),44(4):1200 -1218.

汪建国,陈代钊,王清晨,等, 2007. 中扬子地区晚震旦世—早寒武世转折期台 - 盆演化及烃源岩形成机理[J]. 地质学报,81(8):1102 -1109.

汪泽成,姜华,陈志勇,等, 2020. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 47(5):884 -897.

汪泽成,姜华,王铜山,等, 2014. 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,41(3):305 -312.

汪泽成,刘静江,姜华,等, 2019. 中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义[J]. 石油勘探与开发,46(1):39 -51.

汪正江,杜秋定,邓奇,等, 2016. 华南扬子新元古代沉积盆地演化与古地理[M]. 北京:科学出版社:1 -187.

汪正江,汪泽成,余谦,等, 2021. 川东北新元古代克拉通裂陷的厘定及其深层油气意义[J]. 沉积与特提斯地质,41(3): 361 -375.

汪正江,王剑,江新胜,等, 2015. 华南扬子地区新元古代地层划分对比研究新进展[J]. 地质论评,61(1):1 -22.

汪正江,王剑,卓皆文,等, 2011. 扬子陆块震旦纪 - 寒武纪之交的地壳伸展作用——来自沉积序列与沉积地球化学证据[J]. 地质论评,57(5):731 -742.

汪正江,杨平,余谦,等, 2017. 中上扬子海相含油气盆地分析与页岩气资源[M]. 北京: 科学出版社:1 -389.

魏国齐,杜金虎,徐春春,等, 2015a. 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,36(1):1 -12.

魏国齐,杨威,杜金虎,等, 2015b. 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,35(1):24 -35.

魏国齐,杨威,张健,等, 2018. 四川盆地中部前震旦系裂谷及对上覆地层成藏的控制[J]. 石油勘探与开发,45(2):179 -189.

文龙,王文之,李林娟,等, 2020. 川西南部灯影组展布特征新认识及油气地质勘探意义. 中国石油勘探,25(3):56 -65.

吴浩若, 2000. 广西加里东运动构造古地理问题[J]. 古地理学报,2(1):70 -76.

徐亚军,杜远生, 2018. 从板缘碰撞到陆内造山:华南东南缘早古生代造山作用演化[J]. 地球科学,43(2):333 -353.

杨瑞东,朱立军,王世杰,等, 2005. 贵州寒武系底部碳同位素负异常的地层学和生物学意义[J]. 地质学报,79 (2):157 - 164.
杨雨,黄先平,张健,等, 2014. 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,34(3):38 - 43.
姚金龙,赵国春,韩以贵,等, 2021. 晚新元古代 - 早寒武世现代板块构造与现代地球系统的建立. 西北大学学报(自然科学版),51(6):1007 - 1018.
游军,张小明,杨运军,等, 2018. 略阳白雀寺 - 石瓮子双峰式侵入岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及意义[J]. 矿产勘查,9(12):2365 - 2377.
于炳松, 陈建强, 李兴武, 等, 2002. 塔里木盆地下寒武统底部黑色页岩地球化学及其岩石圈演化意义[J]. 中国科学:地球科学,32(5):374 - 382.
于津海,王丽娟,魏震洋,等, 2007. 华夏地块显生宙的变质作用期次和特征[J]. 高校地质学报,13(3):474 - 483.
余文超,杜远生,周琦,等, 2020. 华南成冰纪“大塘坡式”锰矿沉积成矿作用与重大地质事件的耦合关系[J]. 古地理学报,22(5):855 - 871.
张爱梅,王岳军,范蔚茗,等, 2011. 福建武平地区桃溪群混合岩 U-Pb 定年及其 Hf 同位素组成:对桃溪群时代及郁南运动的约束[J]. 大地构造与成矿学,35(1):64 - 72.
张俊明,李国祥,周传明, 1997. 滇东早寒武世梅树村期浅色粘土岩层的地球化学特征和地质意义. 岩石学报,13(1):100 - 110.
赵路子,汪泽成,杨雨,等, 2020. 四川盆地蓬探 1 井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探,25(3):1 - 12.
赵文智,汪泽成,姜华,等, 2020. 从古老碳酸盐岩大油气田形成条件看四川盆地深层震旦系的勘探地位[J]. 天然气工业,40(2):1 - 10.
周慧,李伟,张宝民,等, 2015. 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,36(3):310 - 323.
周进高,张建勇,邓红婴,等, 2017. 四川盆地震旦系灯影组岩相古地理与沉积模式[J]. 天然气工业,37(1):24 - 31.
周恳恳,许效松, 2016. 扬子陆块西部古隆起演化及其对郁南运动的反映[J]. 地质论评,62(5):1125 - 1133.
周云,赵永山,杜宇晶,等, 2021. 海南岛西北部早古生代安山岩的识别及其大地构造意义[J]. 地球科学,46(11):3850 - 3860.
朱日祥,李献华,侯先光,等, 2009. 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),39 (8):1105 - 1111.
卓皆文,汪正江,王剑,等, 2009. 铜仁坝黄震旦系老堡组顶部晶屑凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评,55(5):639 - 646.
资金平,贾东,魏国齐,等,2017. 四川乐山震旦系灯影组火山碎屑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及盆地裂陷演化讨论[J]. 地质论评,63(4):1040 - 1049.
邹才能,杜金虎,徐春春,等, 2014. 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,41(3):278 - 293.