

# 川西震旦系台内坳槽西缘地层划分与沉积演化

刘朱睿<sup>1</sup>, 胡素云<sup>1</sup>, 谷志东<sup>1</sup>, 汪泽成<sup>1</sup>, 刘桂侠<sup>1</sup>, 翟秀芬<sup>1</sup>,  
姜华<sup>1</sup>, 赵容容<sup>2</sup>, 张宝民<sup>1</sup>, 莫午零<sup>1</sup>

1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油西南油气田公司

**摘要** 近年来四川盆地的天然气勘探揭示,震旦系发育一条贯穿盆地的近北西—南东向的台内坳槽,其形成演化控制坳槽周缘灯影组的储层发育与气田形成。选取紧邻震旦系台内坳槽西缘的绵竹清平大水闸—燕子岩剖面,系统开展地层划分、沉积演化及储层发育特征研究。研究表明:① 碳同位素变化曲线可有效厘定震旦系陡山沱组与灯影组的界线,坳槽西缘陡山沱组与灯影组均发育,且灯影组发育完整;② 陡山沱组以深水斜坡相沉积为主,灯影组主要为浅水碳酸盐台地相沉积,陡山沱组至灯影组经历了由深水斜坡向浅水碳酸盐台地的沉积演化;③ 坳槽西缘灯二段发育厚层叠层石白云岩规模优质储层,与坳槽东侧台缘带可以类比,揭示坳槽西缘同样具备形成大气田的储层条件。

**关键词** 地层划分; 沉积演化; 台内坳槽; 陡山沱组; 灯影组; 震旦系; 四川盆地

**中图分类号**:TE122.2 **文献标识码**:A

## 0 前言

震旦纪是地球演化历史中最重要的时期之一,是元古代向古生代、软体动物向后生动物转变的主要时期,也是罗迪尼亚超级大陆裂解向冈瓦纳超级大陆会聚转变的主要时期<sup>[1-2]</sup>。全球古气候变化与环境变迁,全球范围内可对比的微生物白云岩发育、碳同位素负漂移事件,埃迪卡拉生物群的兴亡等一系列地质和生物事件都发生在这一时期<sup>[3-4]</sup>。

震旦系在华南扬子地块广泛分布,自下而上包括陡山沱组和灯影组<sup>[5]</sup>。近10年来,四川盆地深层天然气勘探揭示震旦系发育一条贯穿盆地的近北西—南东向的台内坳槽,台内坳槽的形成演化控制了坳槽周缘灯影组规模优质储层及大气田的形成与分布<sup>[6-10]</sup>。目前,四川盆地震旦系台内坳槽东缘已钻探大量探井,采集了大面积高精度三维地震数据,已发现安岳特大型气田,前人在震旦系地层序列、沉积演化、储层特征与天然气成藏等方面均开展了细致工作,研究总体较为深入<sup>[11-13]</sup>。

但是,台内坳槽西缘钻井较少,地震资料以二维为主且品质较差,龙门山褶皱—逆冲带构造变形复杂且多期构造叠加,这些问题限制了对坳槽西缘震旦系地层与沉积演化的认识。台内坳槽西缘震旦系是否发育完整的地层序列,是否发育与坳槽东缘类似的沉积演化旋回及规模优质储层等问题还不明确,这也在一定程度上制约了坳槽西缘震旦系的勘探部署实施。

本文选取紧邻震旦系台内坳槽西缘的绵竹清平大水闸剖面和燕子岩剖面,通过露头观察与测量、碳同位素系统取样与室内薄片观察等分析,系统开展坳槽西缘震旦系地层划分、沉积演化与储层发育特征等研究,对于拓展四川盆地震旦系台内坳槽西缘天然气勘探具有重要的意义。

## 1 地质背景

四川盆地震旦系台内坳槽由川中向川西逐渐变宽、变深,坳槽两侧震旦系厚度也逐渐增加,构造沉降曲线揭示川西地区为台内坳槽形成较早且发

收稿日期:2022-01-18;改回日期:2022-04-16;网络出版日期:2022-11-23

本文受国家科技重大专项课题“四川盆地及邻区下古生界—前寒武系成藏条件研究与区带目标评价”(编号:2016ZX05004-005),中国石油科技项目“四川盆地震旦—寒武系重大领域成藏条件与富集规律”(编号:kt2020-01-03)、“四川盆地震旦—寒武系综合地质研究”(编号:2022KT0101)和“残留型海相盆地构造—岩相古地理重建技术研究”(编号:2021DJ0501)联合资助

**第一作者**:刘朱睿,博士,主要从事沉积学研究。通信地址:100083北京市海淀区学院路20号;E-mail:lzr201220@163.com

**通信作者**:谷志东,博士,高级工程师,主要从事盆地构造与油气地质综合研究工作。通信地址:100083北京市海淀区学院路20号;E-mail:guzhidong@petrochina.com.cn

育更为完整的地区<sup>[10]</sup>。四川盆地灯影组总体为碳酸盐台地相沉积,由碳酸盐台地向台内坳槽依次发育台地边缘相、斜坡相和盆地相,台内坳槽主要为斜

坡—盆地相(图1)。本次研究测量的大水闸剖面 and 燕子岩剖面位于四川省绵竹市清平镇,紧邻震旦系台内坳槽西缘,处于灯影组碳酸盐台地相区(图1)。



图1 四川盆地中西部灯二段岩相古地理图(据文献[10],略修改)

Fig. 1 Lithofacies map of Dengying Member 2 in the central and western Sichuan Basin (cited from reference [10], modified)

研究区构造上位于四川盆地西缘龙门山褶皱—逆冲带中段。龙门山褶皱—逆冲带位于青藏高原东南缘,由北向东南延伸约 500 km,宽约 50 km,以灌县—安县断裂为界与四川盆地相邻,以汶川—茂县断裂为界与松潘—甘孜地块相邻<sup>[14-17]</sup>。龙门山褶皱—逆冲带至少经历了两期构造事件:一期为晚三叠世扬子地块与松潘—甘孜地块的会聚,另一期为新生代青藏高原与四川盆地的会聚<sup>[18-19]</sup>。受由北西向南东方向的逆冲影响,研究区基底花岗岩及上覆震旦系、寒武系(仅底部地层)裸露地表。

## 2 震旦系划分

### 2.1 震旦系划分标准

震旦系对应于国际上的埃迪卡拉系,命名于湖北宜昌峡东地区,时限约为 635~541 Ma,岩石地层包括下部的陡山沱组与上部的灯影组<sup>[20-21]</sup>。陡山沱组以碳酸盐岩和碎屑岩混积为主,灯影组以碳酸盐岩沉积为主,两者多为整合接触。湖北峡东地区陡山沱组可进一步划分为四段:陡一段为南华系南沱

组冰碛岩之上的盖帽白云岩,陡二段为黑色泥岩与灰色泥质白云岩互层,陡三段为灰色白云岩、白云质灰岩及条带状灰岩,陡四段为顶部的黑色泥岩<sup>[22]</sup>。四川盆地及周缘陡山沱组普遍缺失下部地层,仅发育陡山沱组中上部,顶部广泛分布的黑色页岩被认为是陡山沱组的标志层之一<sup>[23-24]</sup>。灯影组在四川盆地被划分为四段:灯一段以泥晶白云岩为主,微生物贫乏;灯二段为富含微生物白云岩,典型特征是叠层石、葡萄状、花边状白云岩发育,但上部微生物显著减少;灯三段为混积岩,包括硅质碎屑岩、火山碎屑岩与碳酸盐岩、硅质岩等,普遍发育蓝灰色凝灰质泥岩;灯四段以含硅质条带或团块的白云岩为特征<sup>[25-27]</sup>。

近年来,除了生物地层和岩石地层,震旦系碳同位素化学地层研究取得了重要进展,被用来约束震旦系的划分。华南震旦系陡山沱组记录了3次全球性的海洋碳同位素组成负漂移事件,自下而上分别为陡山沱组底部(陡一段)盖帽白云岩(EN1/CANCE)、中部(陡三段)白云岩(EN2/VANCE)和顶

部(陡四段)白云质泥岩(EN3/DOUNCE)。灯影组总体表现为碳同位素正漂移特征(DEPCE)<sup>[27-29]</sup>。陡山沱组近顶部的碳同位素负漂移事件EN3/DOUNCE/Shuram Excursion为地球演化历史上变化幅度最大的一次碳同位素负漂移事件,在全球多个板块都有记录,虽然其成因存在争议,但是依然被认为是全球范围内震旦系化学地层对比的重要标志<sup>[30]</sup>。因此,陡山沱组顶部的负漂移与灯影组底部的正漂移是震旦系陡山沱组与灯影组划分对比的良好标志,尤其在碳酸盐岩深水斜坡与盆地相区<sup>[22, 31-32]</sup>。

## 2.2 台内坳槽西缘震旦系划分

川西地区,尤其在龙门山褶皱-逆冲带,由于构造变形复杂及沉积相带、岩性变化等原因,震旦系陡山沱组与灯影组划分还不明确。龙门山褶皱-逆冲带震旦系存在许多地方性地层单元名称,与扬子地区陡山沱组、灯影组对应关系还不明确,而且不同剖面震旦系岩石地层单元的对比也存在较多问题。川西地区震旦系自下而上发育一套碳酸盐岩夹碎屑岩地层序列,由于缺乏生物地层、年代地层以及碳同位素化学地层等方面的详细研究,因此仅凭岩性特征难以准确厘定陡山沱组和灯影组的界线。鉴于碳同位素负漂移事件在震旦系划分中的重要作用,本文在绵竹清平大水闸剖面系统采集样品并进行室内碳/氧同位素分析测试,利用同位素化学地层学方法并结合岩石地层特征划分震旦系陡山沱组与灯影组。

绵竹清平大水闸剖面位于龙门山褶皱-逆冲带中段大水闸背斜东翼,紧邻震旦系台内坳槽西缘(图1)。该剖面震旦系发育于青白口系花岗岩(约760 Ma)之上,自下而上划分为48层,下部为硅质碎屑岩与碳酸盐岩混合沉积(1~16层),上部以中一厚层白云岩为主并夹有薄层硅质岩与泥岩(17~48层)(图2)。震旦系底部砾岩与下伏花岗岩呈平行不整合接触,之上为细砂岩、薄层粉砂岩与泥岩互层沉积(1~9层);之上为红色薄层砂岩、红色薄层泥岩沉积(10~11层);第12层起岩性由碎屑岩转变为碳酸盐岩,下部为薄层白云岩、石灰岩夹极薄层泥岩(12~16层),上部以中一厚层白云岩为主(17~48层)。

本文自碳酸盐岩开始出现的第12层起系统取样至第18层,共采集样品35个,用以划分陡山沱

组与灯影组。震旦系第12~18层的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素变化曲线显示, $\delta^{13}\text{C}$ 自下而上经历了由正漂移至负漂移再至正漂移的演化过程(图2)。图2a显示实际测量地层的 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线变化特征;图2b显示随地质年龄变化的 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线变化特征,但第12层之下的碎屑岩地层的时间约束参考了地层厚度比例,并假定底部年龄接近陡山沱组底界年龄635 Ma。 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线显示首个样品值为1.9‰,向上逐渐增加,至第14层中部达最大值4.6‰,第14层上部 $\delta^{13}\text{C}$ 开始由正转负;至第15层 $\delta^{13}\text{C}$ 已为负值,最大负漂移值达-7.8‰;至第16层样品负值开始减小,均值约为-2.6‰,并有正向漂移的趋势;第17层 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-4.1‰~-2.2‰,均值为0.13‰,由负转正的特征明显(图2)。该剖面第15层的碳同位素负漂移接近-8‰,与华南震旦系的碳同位素变化趋势完全一致,是陡山沱组顶部的典型标志,据此将该剖面陡山沱组和灯影组的界线置于第16层顶部。第16层为厚约6 m的黑色泥岩夹石灰岩结核,也是陡山沱组顶部区域性对比标志层。

与完整的震旦系 $\delta^{13}\text{C}$ 变化曲线相比,第12层的曲线有自上而下由负向正转变的趋势,向下可能进入陡三段,其可能与Gaskiers冰期相对应(地质年龄约为580 Ma),因此第12~16层在地质年龄上可能对应于580~551 Ma。但是该剖面下部为碎屑岩地层,其底界年龄由于缺乏古生物与碳同位素约束,还无法准确确定。与湖北峡东地区岩石地层特征进行对比,该剖面第3~11层可能对应于陡二段,而底部的砾岩与细砂岩对应于陡山沱组底部的盖帽白云岩,可能由于川西地区构造沉积环境有利于碎屑岩发育,从而缺失盖帽白云岩沉积<sup>[28]</sup>,因此本文仍假定剖面底部地质年龄为635 Ma。

根据震旦系 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线变化与岩石地层特征分析,剖面第17~48层应为灯影组,岩石地层特征与四川盆地灯影组相一致,纵向可划分为4段:灯一段(17~21层),为微生物不发育的薄—中层泥晶白云岩;灯二段(22~44层),为富含叠层石、葡萄花边和雪花状白云岩;灯三段(45~47层),为厚约8 m的硅质岩夹泥岩;灯四段(48层),为灰色含硅质条带泥晶白云岩。

综上所述,川西绵竹清平大水闸剖面震旦系陡山沱组和灯影组均发育:陡山沱组至少发育陡二段—陡四段,陡一段的盖帽白云岩不发育,可能相变为碎屑岩沉积;灯影组4个岩性段发育完整。陡



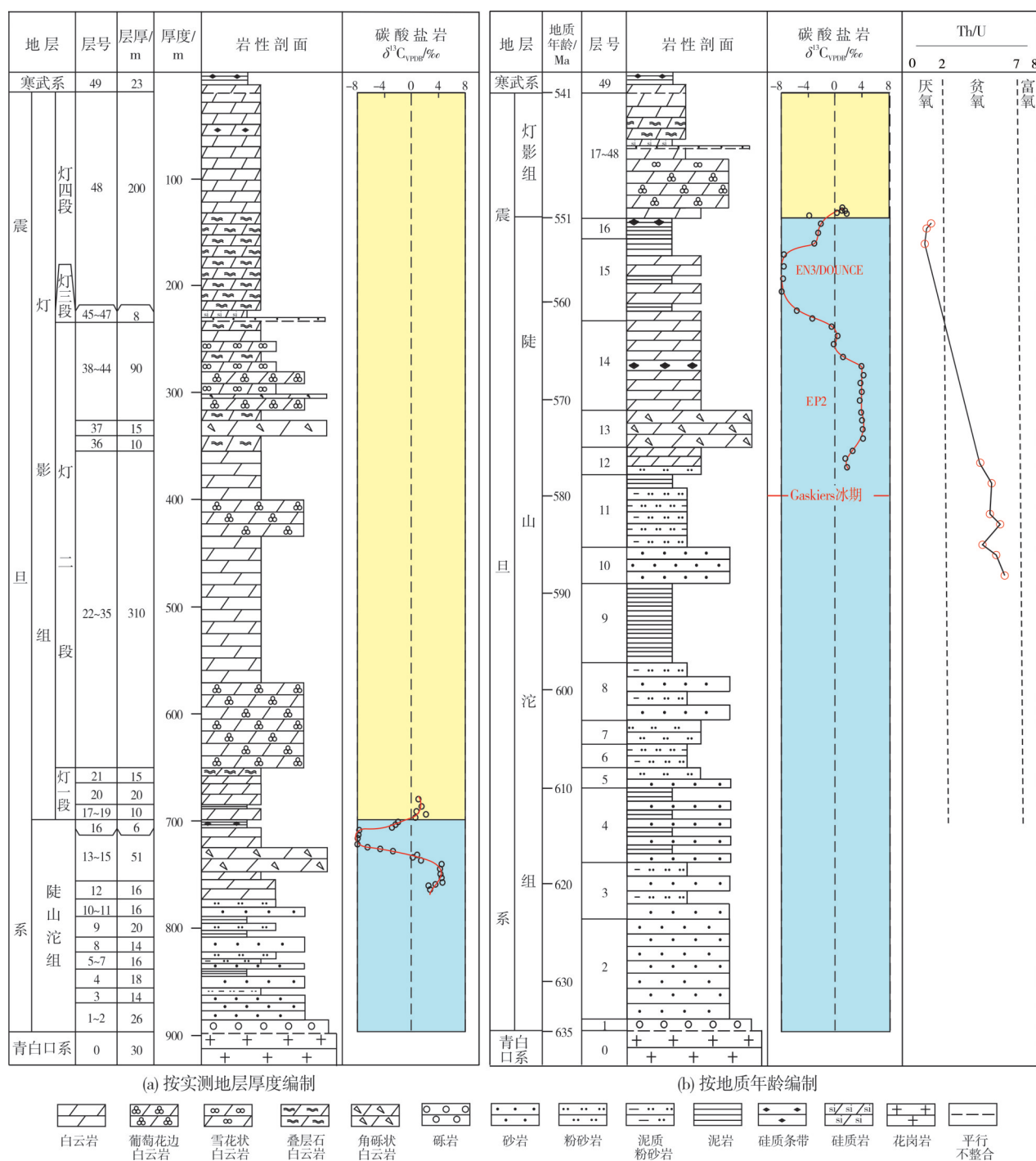


图2 川西绵竹大水闸剖面震旦系柱状图

Fig. 2 Sinian column of the Dashuizha section in Mianzhu area, western Sichuan Basin

山沱组上部 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线显示的负漂移特征可与扬子地区陡山沱组顶部的负漂移EN3/DOUNCE相对应。该剖面与同为震旦系台内坳槽西侧的威远、资阳地区钻井相比,陡山沱组厚度明显增加,发育地层也更为完整;灯影组发育厚度与盆地内类似,但灯四段的厚度明显增加,发育地层也更为完整。

### 3 震旦系沉积演化

#### 3.1 陡山沱组沉积特征

绵竹清平大水闸剖面陡山沱组与新元古界青白口系花岗岩呈平行不整合接触,底部发育厚约0.8 m的砾岩(第1层)(图2,图3a),砾石成分主要为



花岗岩,为来自附近花岗岩的近源沉积。砾岩之上为厚约26 m的灰色中—厚层细—中砂岩(第2层)(图3a,3b),自下而上岩层厚度逐渐减薄、岩石碎屑粒度逐渐变细,中—厚层砂岩发育板状斜层理并夹薄层泥质粉砂岩,砂岩下粗上细二元结构特征明显,应属三角洲前缘水下分流河道夹分流间湾沉积。剖面第3~6层为薄—中层粉砂岩、细砂岩夹薄层泥岩、泥质粉砂岩(图3b),整体属三角洲前缘水下分流河道、席状砂与前三角洲沉积。剖面第7~9层主要为灰色细砂岩、薄层粉砂岩夹泥岩沉积,滑塌变形构造非常发育(图3c,3d),揭示沉积水体逐渐加深,应属前三角洲与陆棚的过渡带沉积。剖面第10~11层为紫红色细砂岩、粉砂岩与泥岩,一般认为紫红色是浅水暴露环境的产物,但是缺乏干裂雨

痕等典型暴露沉积构造,且深水环境也可出现红层沉积,结合下伏地层的滑塌沉积特征及上覆地层韵律层等深水沉积特征推测该套地层也为深水斜坡沉积。自第12层起,岩性由碎屑岩开始转变为碳酸盐岩,第12层为灰色泥质白云岩,向上可见薄层状白云岩与硅质岩不等厚互层(图3e),韵律结构清晰,表明为深水斜坡相沉积。第13~15层,主要为灰色薄层白云岩、石灰岩与极薄层粉砂岩、泥岩互层(图3f,3g),岩层韵律结构清楚,指示深水斜坡沉积环境。第16层,为黑色硅质页岩、泥质硅质岩夹硅质白云岩条带和结核(图3h),虽然实测部分黑色页岩较薄,但在大水闸背斜北西翼可见厚度较大的黑色页岩,其内夹小型碳酸盐岩滑塌体,因此该段应属斜坡—盆地相沉积。

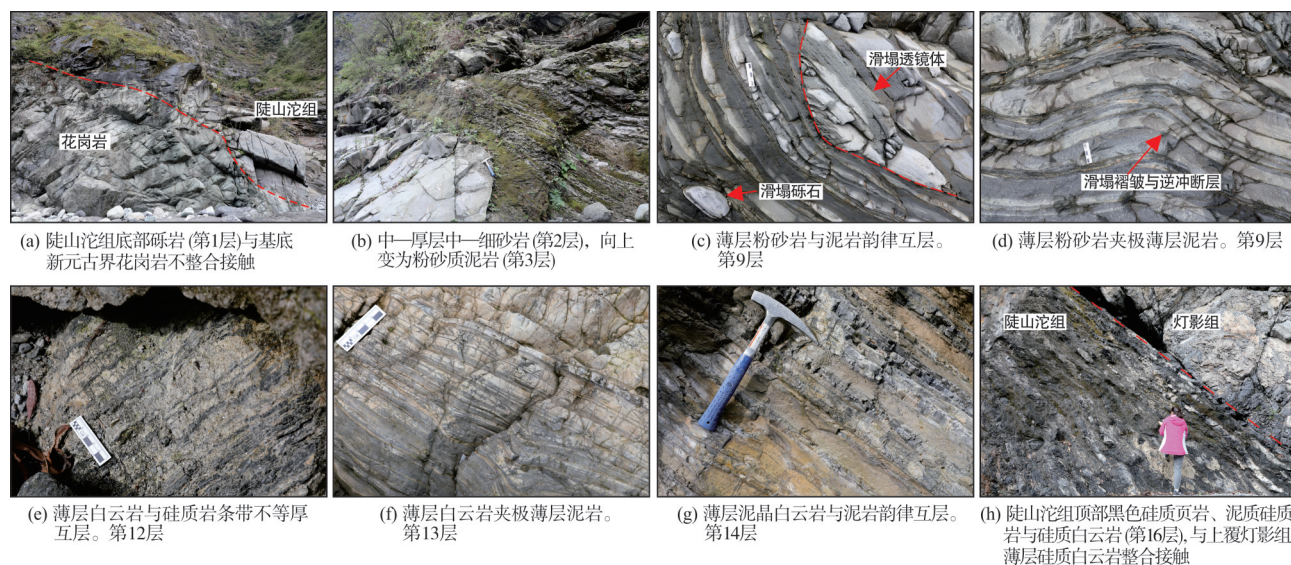


图3 川西绵竹大水闸剖面陡山沱组典型野外露头照片

Fig. 3 Typical photos of Doushantuo Formation of the Dashuizha section in Mianzhu area, western Sichuan Basin

总之,该剖面陡山沱组下部以硅质碎屑岩为主(1~11层),上部以碳酸盐岩为主(12~16层),自下而上陆源碎屑含量逐渐减少,碳酸盐岩逐渐增加。该剖面揭示陡山沱组沉积期,川西地区发生大规模的海侵作用,新元古界花岗岩逐渐被海水所覆盖,陡山沱组底部发育三角洲前缘、前三角洲沉积,随海侵作用逐渐加强,陡山沱组经历了深水陆棚相、斜坡—盆地相的沉积演化。陡山沱组碎屑岩Th/U值自下而上逐渐减小,揭示了由贫氧至厌氧环境的变化(图2b)。该剖面总体揭示了陡山沱组沉积水体逐渐加深的过程,下部的硅质碎屑岩由中—厚层构

造转变为薄—中层构造,滑塌变形褶皱、滑塌透镜体与碎屑岩韵律结构清晰(图3c,3d),指示了深水斜坡的沉积环境。剖面上部碳酸盐岩主要为薄层韵律结构,并夹硅质岩、碳酸盐岩条带与结核,指示了深水斜坡相的沉积特征。剖面顶部黑色页岩表明陡山沱组沉积末期发生大规模的海侵,这与区域上陡山沱组的沉积环境相一致。

### 3.2 灯影组沉积特征

灯影组与下伏陡山沱组连续沉积,整合接触(图2,图3h),灯一段—灯四段各段的岩性特征明



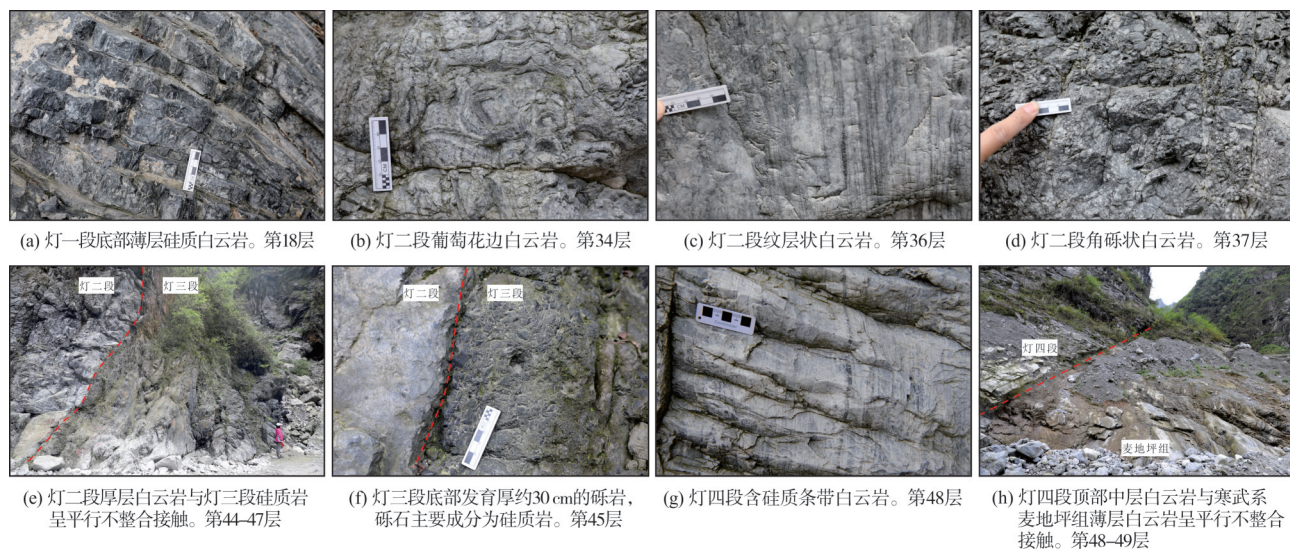


图4 川西绵竹大水闸剖面灯影组典型野外露头照片

Fig. 4 Typical photos of Dengying Formation of the Dashuizha section in Mianzhu area, western Sichuan Basin

显,主要为碳酸盐台地相沉积。

灯一段(17~21层),为薄—中层含硅质泥晶白云岩(图4a),微生物纹层结构不发育,自下而上硅质含量逐渐减少,白云岩单层厚度逐渐增加。

灯二段(22~44层),为富含葡萄花边构造(图4b)和微生物纹层(图4c)的中—厚层白云岩。葡萄花边构造、雪花状构造和微生物纹层构造是四川盆地及周缘灯影组浅水碳酸盐台地相的标志。该剖面发育数层微生物纹层构造和葡萄花边构造,也见数层角砾状白云岩(图4d)。

灯三段(45~47层),与下伏灯二段白云岩平行不整合接触,为厚约8 m的黑色硅质岩夹泥岩沉积(图4e)。底部见30 cm厚的底砾岩,砾石成分为硅质岩(图4f),其上为黑色硅质岩夹泥岩。灯三段厚度虽然较薄,但是这套硅质岩、泥岩夹于大套碳酸盐岩内部,岩性特征差异显著,已成为四川盆地灯三段的对比标志之一。该套黑色硅质岩与泥岩的发育,指示灯二段浅水沉积之后,灯三段沉积期又发生了一期海侵作用,沉积水体明显加深,应属斜坡—盆地相沉积。

灯四段(48层),为薄—中层含硅质条带白云岩(图4g),与同期川中地区台地相的沉积特征类似,说明处于构造条件相对稳定的台地环境。灯四段与上覆寒武系麦地坪组灰色薄层白云岩平行不整合接触(图4h)。

总之,灯影组继承陡山沱组沉积环境,但陆源

碎屑供给较少,主要为碳酸盐台地沉积。灯一段—灯二段,岩层厚度逐渐增加,微生物纹层、叠层石等微生物成因构造等逐渐发育,反映了沉积水体逐渐变浅的演化过程。灯三段黑色薄层硅质岩、泥岩的发育,反映沉积环境突然发生变化,揭示新一期大规模的海侵作用以及深水沉积。灯四段总体为浅水碳酸盐台地沉积。因此,灯影组经历了沉积水体由浅(灯一段—灯二段)变深(灯三段)再变浅(灯四段)的沉积演化。

### 3.3 震旦系沉积演化

扬子地区震旦系发育于南华系南沱组冰碛岩之上,代表南华纪大规模冰期结束之后新一轮的海侵沉积<sup>[24]</sup>。绵竹清平大水闸剖面震旦系平行不整合于新元古界花岗岩之上,同样为震旦纪海侵沉积的产物。该剖面陡山沱组发育近似完整,厚约为200 m,沉积时限约为80 Ma,自下而上经历了三角洲前缘、前三三角洲、陆棚、斜坡相的沉积演化;灯影组发育完整,厚约为680 m,沉积时限约为10 Ma,总体表现为碳酸盐台地相沉积。

陡山沱组中下部的砾岩、细砂岩和上覆的粉砂岩与泥岩互层,代表南沱组冰期结束以后海侵沉积开始(图5a);陡山沱组上部发育的薄层韵律结构碳酸盐岩,指示了深水斜坡沉积环境(图5b);陡山沱组顶部黑色硅质页岩、泥质硅质岩,代表另一期海侵沉积(图5c),黑色页岩应为最大海泛面凝缩层沉

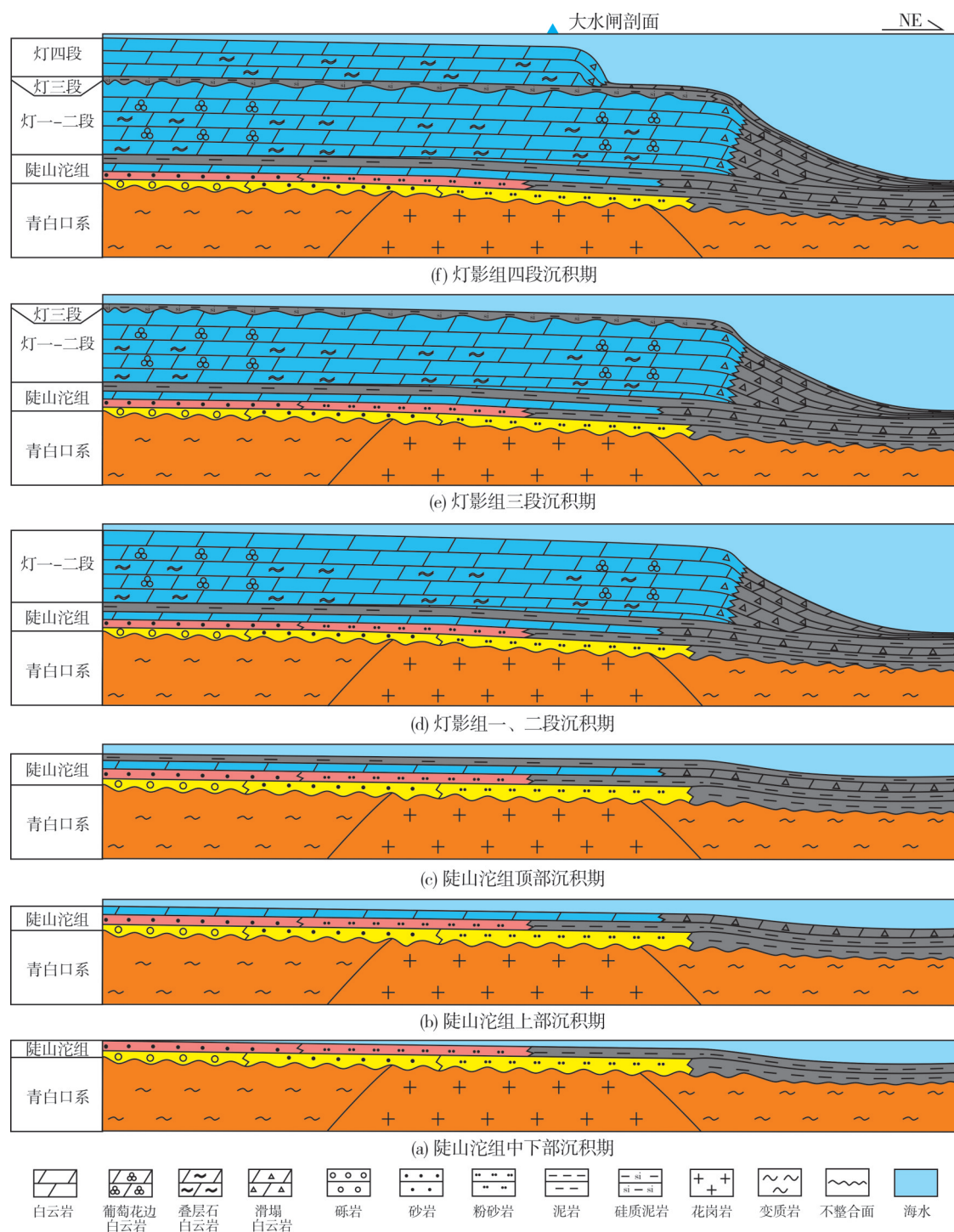


图5 震旦系台内坳槽西缘沉积演化模式图

Fig. 5 Sedimentary evolution model in west of the Sinian intraplatform trough

积,指示陡山沱组沉积末期海平面上升事件<sup>[24,33]</sup>;黑色页岩之上灯一段—灯二段为水体变浅的碳酸盐台地相沉积(图5d);灯三段的硅质岩夹泥岩代表另一期大规模海侵沉积(图5e),该期海侵在四川盆地及周缘广泛发育,盆地内部表现为明显的碳酸盐岩

退积作用;灯四段发育的厚层白云岩代表浅水碳酸盐台地相沉积(图5f)。

震旦系陡山沱组至灯影组总体经历了由深水斜坡相向浅水碳酸盐台地相的沉积演化。平面上,研究区北东方向为震旦系台内坳槽,总体为深水斜



坡—盆地沉积环境,台内坳槽东缘为浅水碳酸盐台地相沉积<sup>[16]</sup>,因此,震旦系发育了由台地→斜坡→盆地相完整的沉积演化序列。

4 灯影组储层发育特征

四川盆地震旦系台内坳槽东缘PT1井的钻探表明,坳槽东缘灯二段发育规模优质储层,是四川盆地近期勘探的重点领域。PT1井灯二段储层岩性主要为泡沫绵层白云岩、凝块石白云岩、砂屑白云岩和叠层石白云岩,溶蚀孔洞发育<sup>[34]</sup>。台内坳槽西缘

灯影组是否发育类似的规模优质储层是一个非常重要的问题。考虑到紧邻台内坳槽西缘的两个实测剖面中,绵竹清平燕子岩剖面灯二段储层较大水闸剖面更发育,本文选取燕子岩剖面开展详细的露头观察与室内薄片分析。

燕子岩剖面位于大水闸剖面南侧,仅出露灯二段,未见灯影组下部及陡山沱组,其顶与泥盆系呈不整合接触(图6),接触面见厚约10~30 cm的黄色黏土层。该剖面灯二段出露约100 m,叠层石白云岩与葡萄花边状白云岩非常发育,见多个纵向叠置的微生物

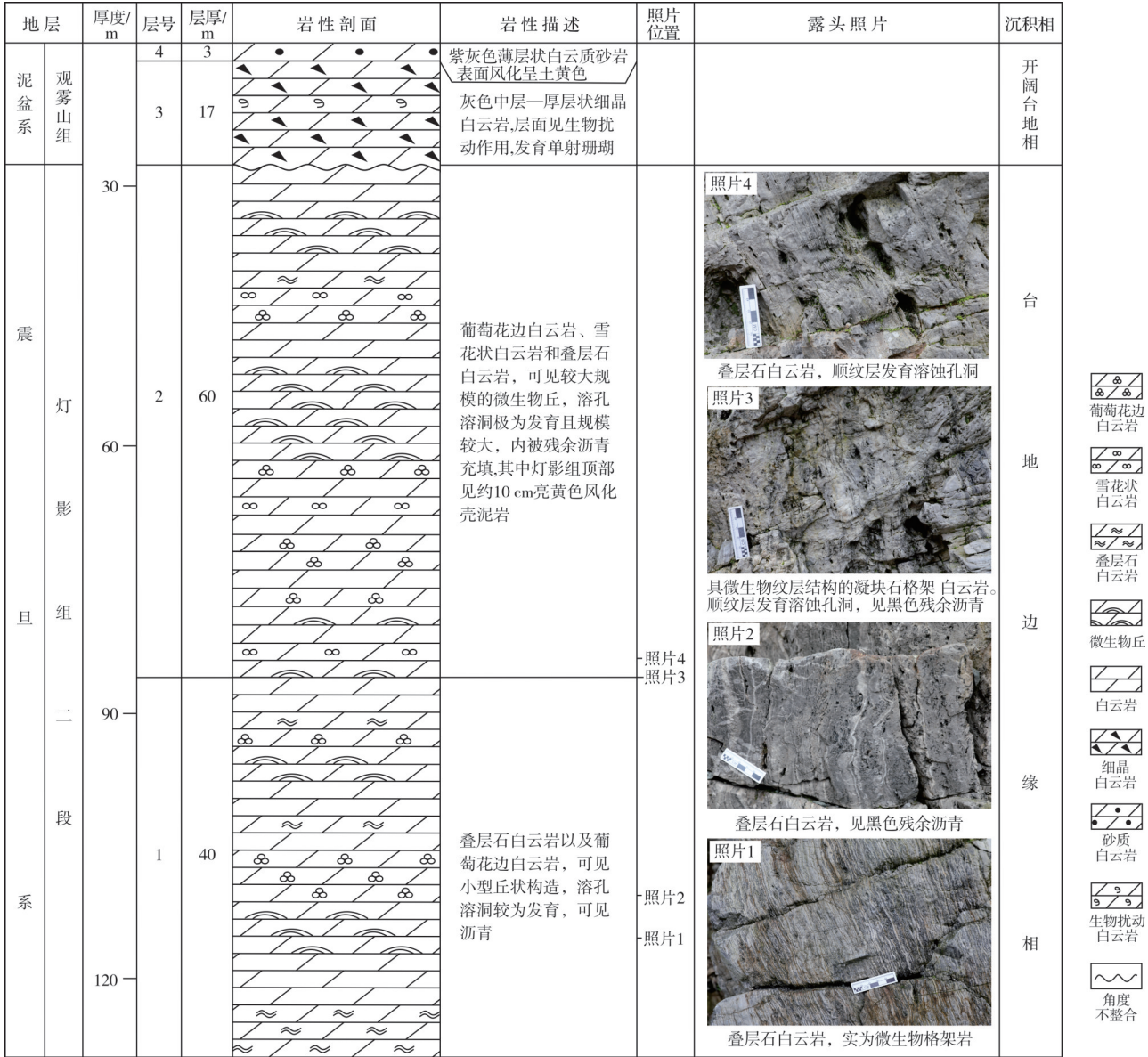


图6 川西绵竹燕子岩剖面灯影组柱状图  
Fig. 6 Column of Dengying Formation of the Yanziyan section in Mianzhu area, western Sichuan Basin

物丘建造,自下而上微生物丘的规模逐渐增大。

该剖面灯二段储层厚约80 m,岩石类型主要为叠层石白云岩和凝块石白云岩。受灯二段沉积期后海平面下降影响,灯二段整体遭受大气淡水溶蚀作用,普遍发育顺微生物纹层的溶蚀孔洞(图6,照片),从而具备良好的储集条件。薄片观察发现溶蚀孔洞多被后期纤状、叶片状白云石环边胶结物半充填,形成葡萄花边构造,胶结物充填后的残余孔洞是灯二段最主要的储集空间。

绵竹清平燕子岩剖面灯二段储层岩性类型、厚度等与台内坳槽东缘钻探结果相类似,表明台内坳槽西缘灯二段也发育规模优质储层。这也进一步揭示台内坳槽西缘灯影组具备形成天然气成藏的有利储层条件,是四川盆地灯影组重要的接替勘探领域。

## 5 结 论

(1)野外露头观测与 $\delta^{13}\text{C}$ 变化曲线表明,川西震旦系台内坳槽西缘陡山沱组、灯影组均发育。陡山沱组发育近似完整,为混合沉积,下部以碎屑岩为主,上部以碳酸盐岩为主;灯影组发育完整,4个岩性段特征明显,与台内坳槽东缘可以进行类比。

(2)震旦系台内坳槽西缘陡山沱组以深水斜坡相沉积为主,灯影组以浅水碳酸盐台地相沉积为主,陡山沱组至灯影组经历了由深水斜坡至浅水碳酸盐台地的沉积演化。

(3)震旦系台内坳槽西缘灯二段发育与坳槽东缘类似的规模优质储层,储层岩石类型主要为叠层石白云岩和凝块石白云岩,顺层发育的溶蚀孔洞是主要的储集空间。

(4)震旦系台内坳槽西缘发育与坳槽东缘类似的地层序列、沉积演化旋回与规模优质储层,是四川盆地灯影组未来重要的勘探接替领域。

### 参 考 文 献

- [1] DALZIEL I W D. Overview: Neoproterozoic-Paleozoic geography and tectonics: review, hypothesis, environmental speculation[J]. Geological Society of America bulletin, 1997, 109(1): 16-42.
- [2] CAWOOD P A, ZHAO Guochun, YAO Jinlong, et al. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents[J]. Earth-science reviews, 2018, 186: 173-194.
- [3] 叶云涛,王华建,翟丽娜,等. 新元古代重大地质事件及其与生物演化的耦合关系[J]. 沉积学报, 2017, 35(2): 203-216.
- [4] YE Yuntao, WANG Huajian, ZHAI Lina, et al. Geological events and their biological responses during the Neoproterozoic Era[J]. Acta sedimentologica sinica, 2017, 35(2): 203-216.
- [5] 旷红伟,柳永清,耿元生,等. 中国中新元古代重要沉积地质事件及其意义[J]. 古地理学报, 2019, 21(1): 1-30.
- [6] KUANG Hongwei, LIU Yongqing, GENG Yuansheng, et al. Important sedimentary geological events of the Meso-Neoproterozoic and their significance[J]. Journal of palaeogeography, 2019, 21(1): 1-30.
- [7] 邢裕盛,尹崇玉,高林志. 震旦系的范畴、时限及内部划分[J]. 现代地质, 1999(2): 82-84.
- [8] XING Yusheng, YIN Chongyu, GAO Linzhi. Boundaries and subdivision of the Sinian system[J]. Geoscience, 1999(2): 82-84.
- [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.
- [10] ZOU 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.
- [11] 李建忠,谷志东,鲁卫华,等. 四川盆地海相碳酸盐岩大气田形成主控因素与勘探思路[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 13-26.
- [12] LI Jianzhong, GU Zhidong, LU Weihua, et al. Main factors controlling the formation of giant marine carbonate gas fields in the Sichuan Basin and exploration ideas[J]. Natural gas industry, 2021, 41(6): 13-26.
- [13] 周进高,刘新社,沈安江,等. 中国海相含油气盆地构造-岩相古地理特征[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 27-37.
- [14] ZHOU Jingao, LIU Xinshe, SHEN Anjiang, et al. The characteristics of tectonic-lithofacies paleogeography of marine petroliferous basins of China[J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(4): 27-37.
- [15] 周进高,沈安江,张建勇,等. 四川盆地德阳—安岳台内裂隙与震旦系勘探方向[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 1-9.
- [16] 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.
- [17] GU Zhidong, LONERGAN L, ZHAI Xiufen, et al. The formation of the Sichuan Basin, South China, during the Late Ediacaran to Early Cambrian[J]. Basin research, 2021, 33(4): 2328-2357.
- [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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [13] 谷志东, 殷积峰, 姜华, 等. 四川盆地西北部晚震旦世—早古生代构造演化与天然气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 1-11.
- GU Zhidong, YIN Jifeng, JIANG Hua, et al. Tectonic evolution from Late Sinian to Early Paleozoic and natural gas exploration in northwestern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(1): 1-11.
- [14] CHEN Shefa, WILSON C J L, WORLEY B A. Tectonic transition from the Songpan-Garzê Fold Belt to the Sichuan Basin, south-western China [J]. Basin research, 1995, 7(3): 235-253.
- [15] LI Wei, YU Huaqi, DENG Hongbin. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin[J]. Petroleum exploration and development, 2012, 39(6): 725-735.
- [16] XUE Zhenhua, MARTELET G, LIN Wei, et al. Mesozoic crustal thickening of the Longmenshan belt (NE Tibet, China) by imbrication of basement slices: insights from structural analysis, petrofabric and magnetic fabric studies, and gravity modeling[J]. Tectonics, 2017, 36(12): 3110-3134.
- [17] YAN Danping, ZHOU Yu, QIU Liang, et al. The Longmenshan Tectonic Complex and adjacent tectonic units in the eastern margin of the Tibetan Plateau: a review[J]. Journal of Asian earth sciences, 2018, 164: 33-57.
- [18] YONG L, ALLEN P A, DENSMORE A L, et al. Evolution of the Longmen Shan Foreland Basin (western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian Orogeny [J]. Basin research, 2003, 15(1): 117-138.
- [19] WANG Erchie, MENG Kai, SU Zhe, et al. Block rotation: tectonic response of the Sichuan Basin to the southeastward growth of the Tibetan Plateau along the Xianshuihe-Xiaojiang fault[J]. Tectonics, 2014, 33(5): 686-718.
- [20] CONDON D, ZHU Maoyan, BOWRING S, et al. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China [J]. Science, 2005, 308(5718): 95-98.
- [21] 王泽九, 黄枝高, 姚建新, 等. 中国地层表及说明书的特点与主要进展[J]. 地球学报, 2014, 35(3): 271-276.
- WANG Zejiu, HUANG Zhigao, YAO Jianxin, et al. Characteristics and main progress of the stratigraphic chart of China and directions [J]. Acta geoscientica sinica, 2014, 35(3): 271-276.
- [22] JIANG Ganqing, SHI Xiaoying, ZHANG Shihong, et al. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635 - 551Ma) in South China [J]. Gondwana research, 2011, 19(4): 831-849.
- [23] 刘静江, 李伟, 张宝民, 等. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 735-753.
- LIU Jingjiang, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Sedimentary palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze region [J]. Journal of palaeogeography, 2015, 17(6): 735-753.
- [24] 杨爱华, 朱茂炎, 张俊明, 等. 扬子板块埃迪卡拉系(震旦系)陡山沱组层序地层划分与对比[J]. 古地理学报, 2015, 17(1): 1-20.
- YANG Aihua, ZHU Maoyan, ZHANG Junming, et al. Sequence stratigraphic subdivision and correlation of the Ediacaran (Sinian) Doushantuo Formation of Yangtze Plate, South China[J]. Journal of palaeogeography, 2015, 17(1): 1-20.
- [25] 谷志东, 李宗银, 袁苗, 等. 四川盆地及其周缘晚震旦世—早寒武世早期区域抬升运动对岩溶储层发育的影响[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 37-45.
- GU Zhidong, LI Zongyin, YUAN Miao, et al. Influences of regional uplifting during the Late Sinian-Early Cambrian on the development of karst reservoirs in the Sichuan Basin and its peripheral area [J]. Natural gas industry, 2014, 34(8): 37-45.
- [26] 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.
- [27] 邓胜徽, 樊茹, 李鑫, 等. 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, 2015, 39(3): 239-254.
- DENG Shenghui, FAN Ru, LI Xin, et al. Subdivision and correlation of the Sinian (Ediacaran) system in the Sichuan Basin and its adjacent area [J]. Journal of stratigraphy, 2015, 39(3): 239-254.
- [28] ZHU Maoyan, ZHANG Junming, YANG Aihua. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2007, 254(1/2): 7-61.
- [29] 周传明, 袁训来, 肖书海, 等. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(1): 7-25.
- ZHOU Chuanming, YUAN Xunlai, XIAO Shuhai, et al. Ediacaran integrative stratigraphy and timescale of China [J]. Scientia sinica (terre), 2019, 49(1): 7-25.
- [30] 周传明, 欧阳晴, 王伟, 等. 中国埃迪卡拉纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志, 2021, 45(3): 211-222.
- ZHOU Chuanming, Ouyang Qing, WANG Wei, et al. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Ediacaran in China [J]. Journal of stratigraphy, 2021, 45(3): 211-222.
- [31] 刘鹏举, 尹崇玉, 陈寿铭, 等. 华南峡东地区埃迪卡拉(震旦)纪年代地层划分初探[J]. 地质学报, 2012, 86(6): 849-866.
- LIU Pengju, YIN Chongyu, CHEN Shouming, et al. Discus-



- sion on the chronostratigraphic subdivision of the Ediacaran (Sinian) in the Yangtze Gorges area, South China [J]. *Acta geologica sinica*, 2012, 86(6): 849–866.
- [32] ZHANG Shihong, LI Haiyan, JIANG Ganqing, et al. New paleomagnetic results from the Ediacaran Doushantuo Formation in South China and their paleogeographic implications [J]. *Precambrian research*, 2015, 259: 130–142.
- [33] LI Chao, LOVE G D, LYONS T W, et al. A stratified redox model for the Ediacaran Ocean [J]. *Science*, 2010, 328 (5974): 80–83.
- [34] 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等. 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*, 2020, 25 (3): 1–12.
- ZHAO Luzi, WANG Zecheng, YANG Yu, et al. Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin [J]. *China petroleum exploration*, 2020, 25(3): 1–12.

编辑:董庸

## The stratigraphic division and sedimentary evolution of the western Sinian intraplateform trough in the western Sichuan Basin, South China

LIUZHU Ruizhi, HU Suyun, GU Zhidong, WANG Zecheng, LIU Guixia, ZHAI Xiufen, JIANG Hua, ZHAO Rongrong, ZHANG Baomin, MO Wuling

**Abstract:** The Sinian is extensively distributed in the Yangtze Block, South China, comprising the Doushantuo and Dengying Formations from base to top. In the recent years, hydrocarbon exploration in the Sichuan Basin has revealed that an approximately NW–SE trending intraplateform trough was formed during the Sinian, and its formation and evolution controlled the reservoir development and gas field formation of the Dengying Formation around the trough. Now the Anyue Field of the Dengying Formation with much research has been found in the eastern intraplateform trough. However, the Sinian sequence, sedimentary evolution and reservoir characteristics in the western intraplateform trough still need to be further studied. In this paper, two representative outcrops close to the western edge of the Sinian intraplateform trough, i.e. the Dashuizha and Yanziyan sections in Mianzhu County, are selected to systematically analyze the stratigraphic division, sedimentary evolution, and reservoir characteristics. The results of this paper show that: (1) The carbon isotope curves can effectively distinguish the Sinian Doushantuo and Dengying Formations. The carbon isotope at the top of the Doushantuo Formation is characterized by negative shift (up to  $-8\text{‰}$ ), which is considerably compared with that at the base of the Dengying Formation with positive shift. Both the Doushantuo and Dengying Formations were developed in the western intraplateform trough. The Doushantuo Formation at least includes Members 2 to 4, and the typical cap dolomite of Member 1 is not occurred. And the Dengying Formation is completely developed, from base to top, including Members 1 to 4. (2) The Doushantuo Formation is composed of a mixed succession including the lower dominant siliciclastic rocks and the upper dominant carbonate rocks. Furthermore, the Doushantuo Formation is dominated by deep–water slope facies deposition with the features of syn–depositional slump folds, rhythmites of interbedded carbonate and mudstone, and olistostrome breccias. The Dengying Formation comprises dolomites with minor chert and mudstone, and it is mainly shallow water carbonate platform facies deposition with the development of microbial laminated dolomites and botryoidal dolomites. Thus, during the Sinian the study area experienced a sedimentary evolution from deep–water slope to shallow water carbonate platform. (3) Thick microbial laminated dolomite reservoir with large scale and high quality was developed in the Dengying Member 2 in the western intraplateform trough, which could be compared with eastern intraplateform trough, revealing that the western intraplateform trough has also the excellent reservoir conditions of large gas field formation.

**Key words:** stratigraphic division; sedimentary evolution; intraplateform trough; Doushantuo Formation; Dengying Formation; Sinian; Sichuan Basin

**LIUZHU Ruizhi**, First author: PhD, mainly engaged in sedimentology. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China

**GU Zhidong**, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive study on basin tectonics and petroleum geology. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China