

四川盆地上震旦统灯影组风化壳古岩溶特征及模式分析

罗贝维¹, 贾承造², 魏国齐³, 杨威³, 谢武仁³, 许海龙¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团公司, 北京 100724;
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

摘要: 风化壳古岩溶的发育是四川盆地上震旦统灯影组获得新突破的重要因素。基于大量野外剖面、钻井岩心及薄片观察、地震、测井及地球化学分析, 在论证灯影组两套风化壳古岩溶发育的基础上, 进行古岩溶相带特征研究及差异分析, 进而建立相应的风化壳古岩溶发育模式。结果表明, 灯影组两套风化壳古岩溶均符合缓坡模式, 但受古地貌坡降差异的影响, 灯四段不整合面附近岩溶作用强烈, 发育大洞穴及角砾、泥岩充填物, 垂向分带结构以水平潜流带和深部缓流带为主; 灯二段不整合面附近岩溶作用相对和缓, 溶洞充填物主要由小粒径的角砾云岩、白云岩组成, 盆地范围内其垂向分带结构以垂向渗流带、水平潜流带及深部缓流带为主。

关键词: 风化壳古岩溶; 古岩溶结构; 古岩溶模式; 上震旦统; 灯影组; 四川盆地

中图分类号: TE 121 **文献标志码:** A

引用格式: 罗贝维, 贾承造, 魏国齐, 等. 四川盆地上震旦统灯影组风化壳古岩溶特征及模式分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(3): 8-19.

LUO Beiwei, JIA Chengzao, WEI Guoqi, et al. Characteristics and models of weathering paleo-karst in Upper Sinian, Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 8-19.

Characteristics and models of weathering paleo-karst in Upper Sinian, Sichuan Basin

LUO Beiwei¹, JIA Chengzao², WEI Guoqi³, YANG Wei³, XIE Wuren³, XU Hailong¹

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*
2. *China National Petroleum Corporation, Beijing 100724, China;*

3. *Langfang Branch of Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Langfang 065007, China*)

Abstract: The development of ancient weathering crust karst in Sinian is the main factor of the breakthrough in Dengying Formation of Sichuan Basin. With a lot of outcrops, drilling coring, thin sections, seismic and well logging data, geochemistry analysis, and on the basis of the comprehensive arguments about the two sets of weathering paleo-karst in Dengying Formation, weathering paleo-karst characteristics and differences between the vertical and horizontal structures were studied to further establish corresponding weathering paleo-karst models. It is concluded that the weathering paleo-karsts in Dengying Formation can be described by the ramp model. However, affected by the different palaeogeomorphology gradient, the strata near the unconformity of the fourth Member of Dengying Formation has the strongest karstification and easy to develop caverns, breccia and mudstone filling. The horizon-phreatic zone and deep-slow-flowing zone are the main part of the karst vertical zonation. The strata near the unconformity of the second Member of Dengying Formation has a relatively slow karstification, with the small size of the dolomite breccia, dolomite as its cave fillings, and mainly develop vertical vadose zone, horizon-phreatic zone and deep-slow-flowing zone.

Keywords: weathering paleo-karst; paleo-karst structure; paleo-karst models; Upper Sinian; Dengying Formation; Sichuan

在机械沉积和岩溶塌积的影响下,洞穴主要被分选较差的砾状白云岩和灰黑色泥岩全充填(图3(c)),角砾云岩主要来自灯影组围岩,灰黑色泥岩来自上覆的寒武系筇竹寺组地层。受气候环境和风化暴露时间的影响,灯二段顶部洞穴发育程度及规

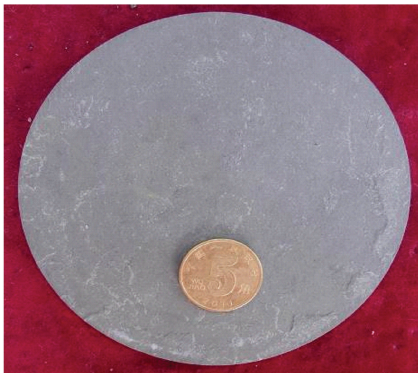
模相对较小,钻井过程中仅在不整合面之下60 m范围内出现零星井漏及放空现象。据岩心资料显示,灯二段洞穴中主要被分选磨圆较差的灰黑色富藻角砾云岩和灰白色粉晶白云岩全充填(图3(d)),富藻角砾和白云岩均来自围岩。



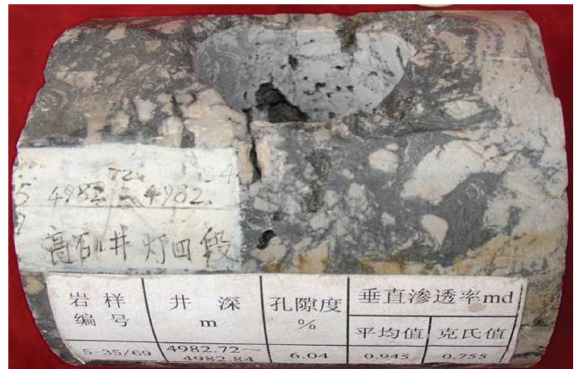
(a) 黑色条带状硅质云岩(威117井,灯一段,3563.35 m)



(b) 灰黑色葡萄状藻白云岩,葡萄平均尺寸为2 cm×3 cm(遵义老木水剖面,灯二段)



(c) 灰白云质泥岩(威28井,灯三段,3012.65 m)



(d) 溶塌角砾云岩(高石2井,灯四段,4982.8 m)

图2 四川盆地灯影组各段露头及岩心特征

Fig. 2 Characteristics of outcrops and drilling cores of Dengying Formation

2.1.3 扩溶缝及溶孔、溶洞

在震旦系岩心中,常见在微张裂缝基础上发育的扩溶缝,且扩溶缝周围常伴随有大量的溶孔(洞)^[17],这种扩溶缝及溶孔、溶洞的发育是岩溶作用发育的有效证据^[18]。研究区灯四段扩溶缝主要在直立或近于直立的微裂缝基础上发育(图3(e)),缝宽约1 cm,垂向上具有一定延伸性,其内被鞍状云岩、石英及部分紫红色黏土、黄铁矿半充填;周边的溶孔规模较小,孔径为0.1~0.8 cm,主要被白云石半—全充填。灯二段扩溶缝有两种类型,除高角度发育外,还发育一种沿40°左右微裂缝发育的扩溶缝(图3(f)),该缝宽约0.5 cm,延伸距离较小,缝内经细晶—巨晶白云石半充填;周边发育的溶孔密集但孔径小,内部一般被白云石、沥青半—全充填。

2.2 地震与测井特征

2.2.1 地震反射特征

地震地层分析是论证地层中不整合面及风化壳

岩溶发育的方法之一,与之相关的地层接触关系包括削截、杂乱反射、上超,而这些不整合接触关系正是在地震剖面上识别地层界面(不整合面)最为可靠和客观的基础^[19]。由研究区地震剖面(图4)可以看到,在盆地内部灯二段顶界自东向西被削截,并被灯三段超覆,呈现出削截—超覆型不整合特征;同时,受构造抬升的影响,盆地内部的灯四段顶部也遭受不同程度剥蚀,形成起伏不平的侵蚀面,局部地区震旦系上部被削截。由此可见,灯二段与灯三段之间、震旦系与寒武系之间的不整合接触在地震上都有清楚的显示。

研究区地震资料局限于川中地区,且利用地震剖面分析判断不整合及风化壳古岩溶存在两点弊端:①有些地区地震反射的地层几何形态表明存在不整合面或风化壳,但在岩心中却没有发现相关的证据;②有些对高孔隙度岩溶储层形成有重要影响的风化壳在地震上没有表现。



图 3 四川盆地上震旦统灯影组古岩溶特征照片

Fig. 3 Photos showing properties of paleo-karst in Dengying Formation of Upper Sinian, Sichuan Basin

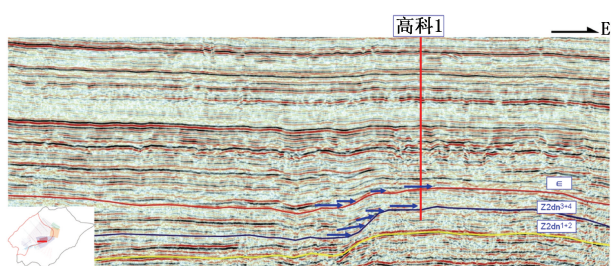


图 4 研究区高科 1 井附近上震旦系灯影组地震剖面

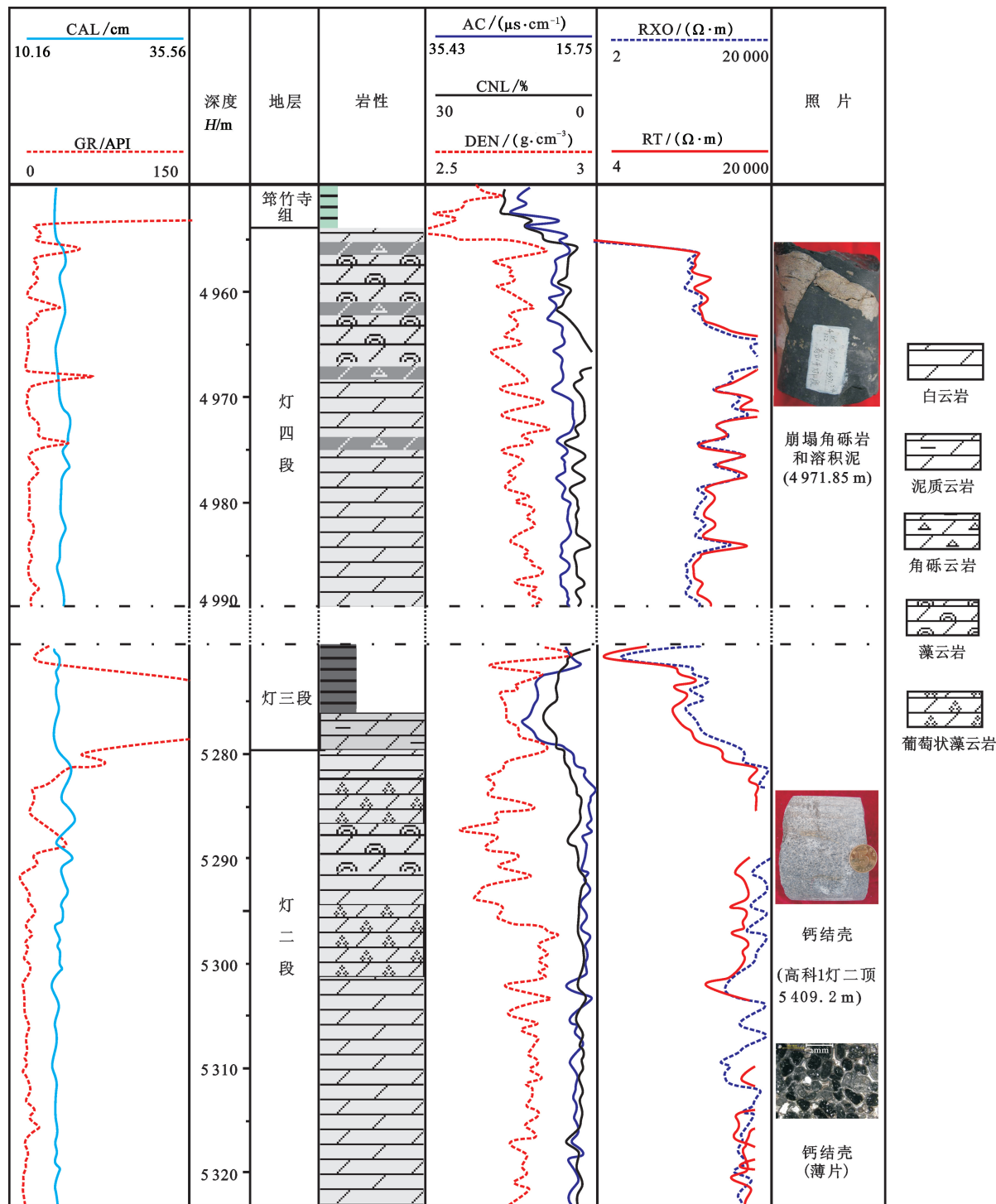
Fig. 4 Seismic profile across well GK1 in Dengying Formation of Upper Sinian, Sichuan basin

2.2.2 测井响应特征

由于层序界面是不整合面,有利于 U、Th 及其他放射性元素富集,层序界面位于伽马能谱基值和

轴、钍含量基值由小变大的部位,因此 GR 测井曲线所揭示的放射性元素的变化也有助于识别暴露面和洪泛面。如图 5 所示,高石 1 井筇竹寺组至灯影组以及灯三段至灯二段接触处测井曲线变化明显:筇竹寺组底部发育暗绿色泥岩,灯三段主要发育灰、黑、蓝灰色泥岩夹薄层白云岩,二者 GR 曲线均具有整体高值的特征。

受风化壳古岩溶的影响,灯四段常发育相对大规模的洞穴及充填物(图 3(c)),由于充填物以上覆的筇竹寺组泥岩为主(图 5),灯四段顶部 GR 曲线常具尖峰状高值。灯二段顶部发育渗流豆,为一套揭示干旱、半干旱环境下古风壳的钙结壳, DEN 测井曲线具有整体低值、持续波动的特征。



注：高石1井灯二段顶部未取心，故利用临近的高科1井灯二段顶部岩心资料（井位见图1）

图5 高石1井灯影组测井响应与岩心特征

Fig. 5 Logging response and core features of Dengying Formation, well GSI

碳酸盐岩储层具有非均质性及裂缝性,其储集空间分析常需结合成像测井等手段^[20]。受风化壳岩溶作用的影响,灯影组储层中蜂窝状的溶蚀孔洞(图6(a))、顺藻纹层的溶蚀孔洞(图6(b))和葡萄花边型溶蚀孔洞极为发育,其中,蜂窝状的洞和顺藻纹层的

洞灯四、灯二均发育,葡萄花边洞主要发育于灯二段。震旦系的天然裂缝主要是构造裂缝,分布有一定的规律性,但多数裂缝有溶蚀作用,因此裂缝面往往不规则,有溶蚀扩大现象(图6(c))。通过成像测井更容易识别天然裂缝,并与诱导裂缝区分(图6(d))。

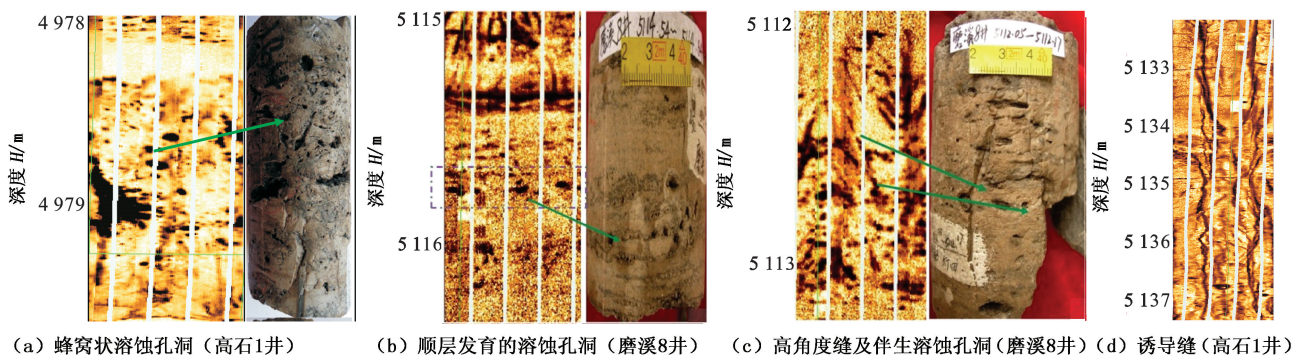


图 6 灯影组不同类型的储集空间及识别

Fig. 6 Reservoir spaces and their recognition of Dengying Formation

2.3 地球化学分析

风化壳在遭受剥蚀过程中由于受到风化淋滤的影响,稳定碳同位素和常量元素会发生元素的迁移,这一特点也是碳酸盐岩地层中识别风化壳古岩溶的有力依据^[21-22]。

本次研究对峨边先锋剖面灯影组地层均匀采集 18 个样品进行碳同位素测定与分析,样品的有效性在分析前已认证。由图 7 可知,碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值分布在 $-1.9\text{‰} \sim 4.16\text{‰}$,平均值为 1.12‰ ,绝大部分值落在 $0 \sim 4\text{‰}$ 。整体上看,灯影组共有 3 个明显的

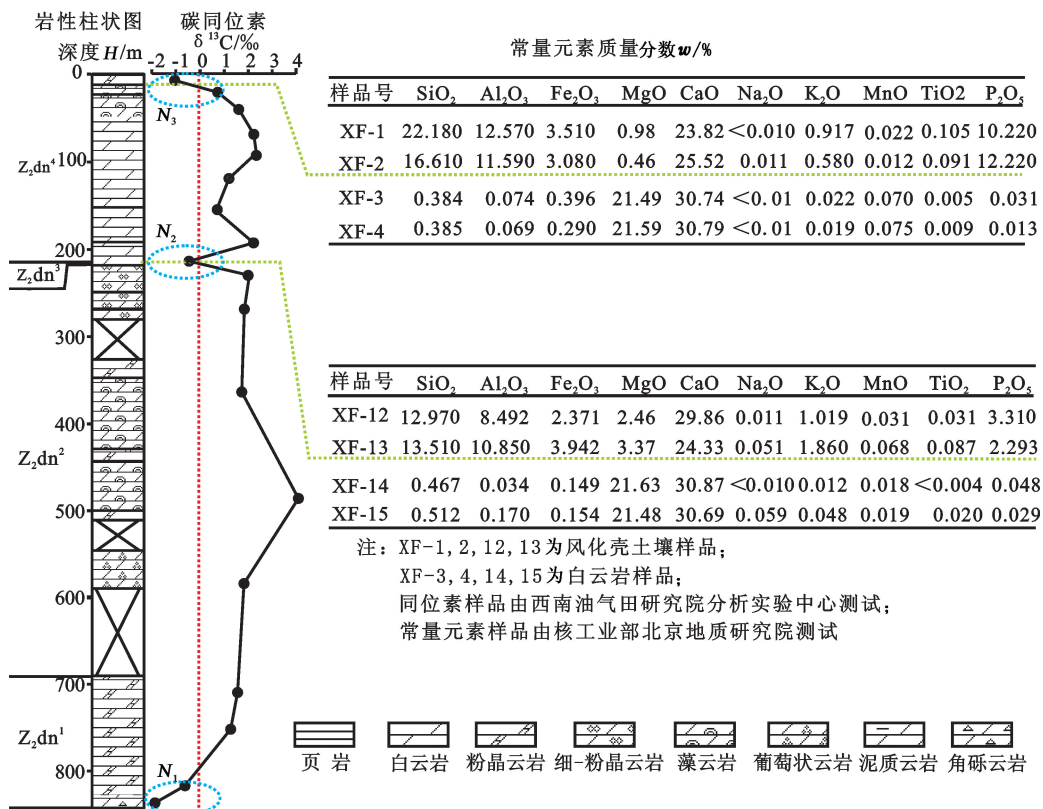


图 7 峨边先锋剖面上震旦统灯影组碳同位素及常量元素测定结果

Fig. 7 $\delta^{13}C$ and major element contents of Dengying Formation in Xianfeng profile

负漂移点(图 7 中 N_1 、 N_2 、 N_3),其中 N_1 点位于灯影组 and 陡山沱组不整合面处, $\delta^{13}C$ 值为 -1.9‰ ; N_2 点位于灯二段和灯三段不整合面处, $\delta^{13}C$ 值为 -0.5‰ ; N_3 点位于震旦系和寒武系不整合面处, $\delta^{13}C$ 值为 -1.0‰ 。尽管 $\delta^{13}C$ 值的正负漂移受到海平面、气候、火山活动等众多因素的影响,但由于在灯四段

顶部和灯二段顶部均发现大量有暴露岩溶的证据(图 3), N_2 和 N_3 两个负漂移可能主要是受海平面下降后淡水淋滤的影响,即在灯一段沉积初期和灯二段沉积末期,盆地海平面下降速率大于盆地沉降速率,导致了区域性风化壳古岩溶的发育。

同时,本文中通过采集两套不整合面附近的风

化壳土壤和下伏基岩样品,开展常量元素分析与研究(图7)。受各元素抗风化能力差异的影响,风化壳土壤层在碳酸盐岩风化过程中主要表现为MgO的淋失和SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、MnO、P₂O₅等不同程度的相对富集,K₂O、Na₂O、CaO在基岩与黏土层中的差异并不明显。受风化暴露时间及气候环境的影响,两套风化壳的常量元素又存在一定差异,其中,灯四段风化壳中相对惰性的元素(Si、Al、Fe、Ti等)更为富集,而活动性元素(Mg)淋失量更大。另外,灯四段风化壳中P元素的高度富集更高,与寒武系底部含磷层相对应,可能与寒武系早期成磷事件有关。

3 风化壳古岩溶特征

风化壳岩溶的发育过程中,在持续的构造运动及长期的淡水淋滤作用下,碳酸盐岩发生强烈溶蚀并在垂向上呈现出明显的分带性。在前人研究^[23-24]的基础上,依据大量的镜下薄片分析及钻井资料,通过古岩溶垂向结构的单剖面刻画及横向对比分析,明确上震旦统两套风化壳古岩溶的纵向结构及横向展布特征,为风化壳古岩溶发育模式的建立提供理论依据。

3.1 古岩溶相带的垂向结构

本文中以全取心井威117井为例开展古岩溶相带垂向特征的刻画。总体上,威117井主要发育渗流带、潜流带和缓流带,缺乏表生岩溶带的发育,其具体的垂向分带结构及特征(图8)如下。

垂向渗流带:由于暴露地表,在沿高角度裂缝或管道向下渗流的淡水影响下,该带主要发育垂向展布的溶孔(洞)、溶沟。威117井渗流带主要发育在灯二段顶面下70 m,岩性以灰—浅灰色富藻砂屑云岩、细—粉晶白云岩为主,局部含葡萄状藻云岩。储集空间以构造缝、高角度扩溶缝为主,伴随少量的溶沟、溶孔(洞)。其中,构造缝常紧密排列,缝内被泥质或砂屑云岩全充填(图8岩心照片(b));扩溶缝及溶沟、溶洞规模较大,缝宽一般可达1 cm,溶洞直径最大可达16 cm,其内被白云石、石英及沥青半—全充填。

水平潜流带:受地下水水平径流的影响,该带是岩溶作用最为活跃的区域,储集性能好,常有大型溶洞及联通性较好的溶孔(洞)发育。威117井潜流带包括两套:第一套属于灯四段古岩溶系统,发育于灯影组顶面下25 m,岩性以灰黑色砂屑粉晶云岩及富藻角砾云岩为主(图8岩心照片(a)),其内部构

造缝、针状溶孔以及粒间溶孔、溶蚀孔洞发育,溶蚀空间被泥岩、白云岩全充填;第二套属于灯二段古岩溶系统,位于灯二段顶面下70~290 m,发育大套灰色葡萄状藻云岩及灰黑色富藻角砾云岩。该带顶部主要发育具有水平联通性的高角度扩溶缝,中段以角砾充填的溶洞、粒间溶孔为主,充填物以崩塌堆积的灰白色砂泥岩、白云岩为主,受潜水面变迁的影响,多套角砾云岩在垂向上叠置发育(图8岩心照片(c)、(d));下部以垂向溶蚀裂缝、顺层溶洞为主,溶洞受白云石、石英、沥青及少量黄铁矿半充填。

深部缓流带:该带地下水活动性较弱,与表生作用相关的溶蚀影响大大降低,溶蚀孔洞充填程度整体较高。威117井缓流带位于灯二段不整合面以下290~400 m,以大套的致密泥晶云岩的出现为底界。岩性上以大套的粉晶云岩为主,含富藻云岩,常见同生期—准同生期发育的鸟眼构造(图8岩心照片(e))。溶蚀孔洞不发育,但缝合线较发育,密集段可达15条/10 cm(图8岩心照片(f))。

未影响带:该带位于不整合面以下超过400 m的深度处,表生岩溶作用对此深度以下的地层没有直接影响。该带顶部主要发育灰白色泥晶云岩,夹部分砾屑云岩、富藻云岩;底部为灯一段的黑色硅质泥晶云岩,富含黑色硅质条带。整体致密(图8岩心照片(g)),仅见压溶缝、构造缝及部分孤立的溶蚀洞,洞内被热液成因的鞍状白云石全充填(图8岩心照片(h))。

可见,在构造运动及潜水面控制下,威117井灯四段古岩溶系统主要发育水平潜流带,其上缺失垂向渗流带;灯二段古岩溶系统的垂向渗流带位于不整合面之下0~70 m,水平潜流带在不整合面以下70~290 m,再往下则过渡至风化壳岩溶影响较弱的深部缓流带及表生岩溶未影响带。

3.2 古岩溶结构的区域展布

在对研究区灯影组古岩溶垂向分带特征认识的基础上,对川中—川西等震旦系勘探的主体区域进行岩溶相带的对比分析(图9,剖面位置见图1),认为灯影组两套风化壳古岩溶结构具有以下特征:

(1)灯四段风化壳古岩溶主要发育水平潜流带和深部缓流带,垂向渗流带带仅在古地貌高部位的川中地区出露,缺乏表层岩溶带的发育。其中,渗流带影响深度为灯四段不整合面之下0~20 m,以发育大量高角度裂缝及少量溶孔为主要特征;潜流带主要作用于灯四段不整合面之下20~100 m,发育大型洞穴及大规模的顺层溶孔、溶洞,是灯影组上部

岩、石英、沥青半—全充填的溶洞、粒间溶孔;缓流带厚度稳定,其影响深度为灯二段段不整合面之下

300~400 m,除发育大套的鸟眼孔外,岩溶特征与灯四段的深部缓流带基本相似。

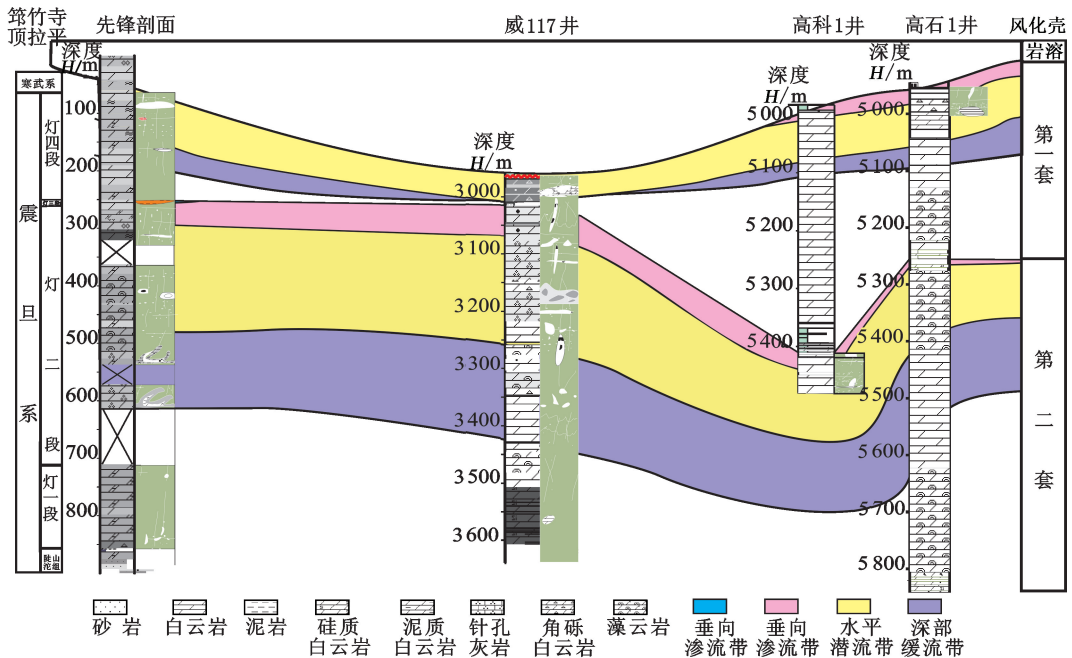


图9 四川盆地灯影组古岩溶结构横向对比

Fig.9 Horizontal comparison of paleo-karst structure in Dengying Formation, Sichuan Basin

4 古岩溶发育模式

前人研究表明,新元古代灯影期四川盆地整体处于拉伸环境下的克拉通内拗陷阶段^[25-26],沉积了广泛分布的浅海厚层碳酸盐岩地层序列,具有明显的碳酸盐岩台地沉积特征^[27]。灯二段至灯四段沉积期,整个四川盆地具有以下特征:

(1)不整合面连续。灯二段与灯四段分别与上覆地层呈不整合接触,除高石梯-磨溪构造西侧的斜坡带、威远-资阳以及盆地周缘地区外,这两套不整合具有区域性平行不整合特征,且不整合面展布稳定。

(2)岩性稳定。灯影组以发育大套的碎屑云岩、藻云岩为主,在区域上其发育3套可作为区域对比的标志层,即灯三段碎屑岩,灯二段、灯四段“富藻层”。

(3)坡降差异小。在野外及岩心观察中,并没有观察到大规模的洞穴及大尺寸角砾充填物发育,说明古岩溶相带区域上过渡平缓,无落差较大的古

岩溶地貌。

由此可见,灯影组两套风化壳古岩溶均符合碳酸盐岩台地中的缓坡模式。尽管宏观的岩溶模式一致,但两套风化壳古岩溶发育程度仍存在一定差异(图10)。

从古地貌特征来看,灯四段古地貌分异明显,其相对于灯二段古地貌具有相对高程高、坡降大的特点。其中,较大的坡降及分异明显的地貌为灯四段的强烈岩溶作用提供了条件。这使得灯四段储层中溶洞(孔)、大的洞穴及其垮塌充填物较发育(威远地区15口钻井放空层统计显示,灯四段放空层占84.5%),其中,充填物主要由大粒径的角砾云岩(图3(c))、泥岩组成,可见碳酸盐岩风化而成的红土。坡降相对较小的灯二段岩溶作用和缓,主要发育同生期-准同生期层间岩溶基础上发育的溶洞(孔),但大的洞穴及其垮塌充填物不常见(威远地区灯二段放空层占15.5%),充填物主要由小粒径的角砾云岩(图3(d))、白云岩组成,可见钙质结壳层。

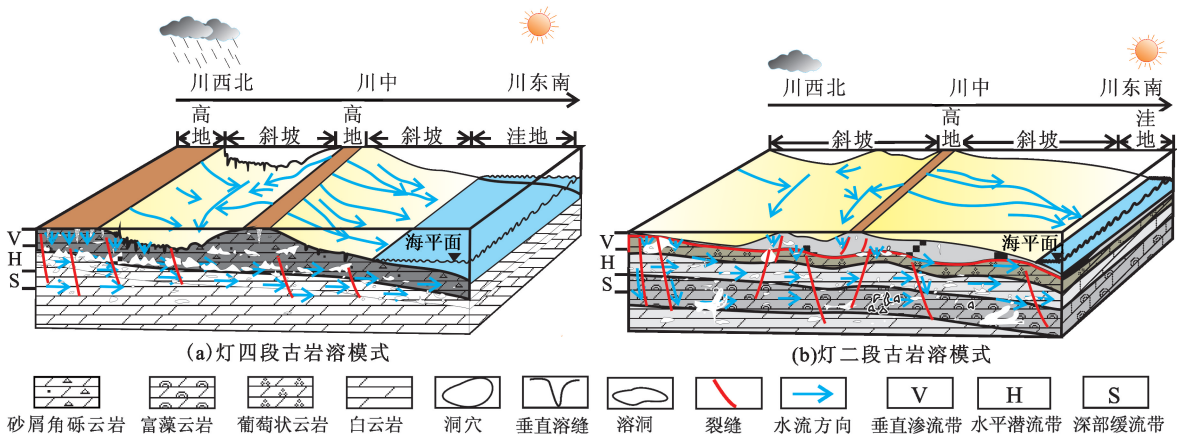


图 10 四川盆地上震旦统灯影组风化壳古岩溶模式

Fig. 10 Weathering crust paleo-karst models of Dengying Formation, Sichuan Basin

5 结论

(1) 露头、岩心证据(地层不整合、洞穴及其充填物、扩溶缝及溶蚀孔洞)与地球化学分析(碳同位素负漂移、常量元素的迁移)表明,上震旦统受桐湾两幕运动的影响发育两期不整合,导致了灯四段和灯二段两套风化壳古岩溶的发育。

(2) 通过古岩溶垂向结构的单剖面刻画及横向对比分析认为,灯四段风化壳古岩溶主要发育水平潜流带和深部缓流带;灯二段风化壳古岩溶主要发育垂向渗流带、水平潜流带及深部缓流带。其中,发育大型洞穴及大规模的顺层溶孔、溶洞的水平潜流带是岩溶作用最强烈区域,该带在灯四段不整合面之下 20~100 m 以及灯二段不整合面之下 60~300 m 均有展布。

(3) 灯影组两套风化壳古岩溶均符合碳酸盐岩台地中的缓坡模式,但灯四段古地貌分异明显,风化壳岩溶作用更强烈。

致谢 感谢中国石油西南油气田宋文海教授在野外及岩心观察过程中给予的悉心指导,以及中国石油勘探开发研究院张宝民教授在岩溶模式的建立方面给予的宝贵意见。

参考文献:

[1] 冉隆辉,谢姚祥,王兰生. 从四川盆地解读中国南方海相碳酸盐岩油气勘探[J]. 石油天然气地质, 2006, 27(3): 289-294.
 RAN Longhui, XIE Yaoxiang, WANG Lansheng. Understanding exploration of marine carbonate reservoirs in South China through Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 289-294.
 [2] 魏国齐,焦贵浩,杨威,等. 四川盆地震旦系一下古生

界天然气成藏条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 5-9.
 WEI Guoqi, JIAO Guihao, YANG Wei, et al. Hydrocarbon pooling conditions and exploration potential of Sinian-Lower Paleozoic gas reservoir in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 5-9.
 [3] 张林,魏国齐,杨威,等. 四川盆地高石梯-磨溪构造带震旦系灯影组的成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 584-589.
 ZHANG Lin, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Analysis of formation mechanism of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi structure belt in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 584-589.
 [4] 孙玮,刘树根,韩克猷,等. 四川盆地震旦系油气地质条件及勘探前景分析[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 350-355.
 SUN Wei, LIU Shugen, HAN Keyou, et al. The petroleum geological condition and exploration prospect analysis in Sinian, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 350-355.
 [5] 向芳,陈洪德,张锦泉. 资阳地区震旦系古岩溶作用及其特征讨论[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 421-424.
 XIANG Fang, CHEN Hongde, ZHANG Jinquan. Paleokarst and its characteristics of Dengying Formation in Ziyang area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 421-424.
 [6] 刘树根,马永生,黄文明,等. 四川盆地上震旦统灯影组储集层致密化过程研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 485-496.
 LIU Shugen, MA Yongsheng, HUANG Wenming, et al. Densification process of Upper Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 485-496.
 [7] 刘树根,秦川,孙玮,等. 四川盆地震旦系灯影组油气

- 四中心耦合成藏过程[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 879-888.
- LIU Shugen, QIN Chuan, SUN Wei, et al. The coupling formation process of four centers of hydrocarbon in Sinian Dengying formation of Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 879-888.
- [8] 洪海涛, 谢继容, 吴国平, 等. 四川盆地震旦系天然气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(11): 37-41, 122.
- HONG Haitao, XIE Jirong, WU Guoping, et al. Potential of gas exploration in the Sinian reservoir, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(11): 37-41, 122.
- [9] 李景明, 魏国齐, 李东旭. 中国西部叠合盆地天然气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 1-6.
- LI Jingming, WEI Guoqi, LI Dongxu. Natural gas exploration prospect in superposition basins, Western China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(1): 1-6.
- [10] 宋文海. 乐山—龙女寺古隆起大中型气田成藏条件研究[J]. 天然气工业, 1996, 16(s1): 13-26.
- SONG Wenhai. Research on reservoir-formed conditions of large-medium gas field of Leshan-Longnvsi palaeohigh[J]. *Natural Gas Industry*, 1996, 16(s1): 13-26.
- [11] 黄汲清. 对四川盆地和鄂尔多斯台坳找油找气的初步意见[J]. 石油与天然气地质, 1980, 1(1): 18-25.
- HUANG Jiqing. Some ideas on the oil and gas potential of Sichuan Basin and Ordos platform downwarp[J]. *Oil & Gas Geology*, 1980, 1(1): 18-25.
- [12] 李启桂, 李克胜, 周卓铸, 等. 四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 516-521.
- LI Qigui, LI Kesheng, ZHOU Zhuozhu, et al. Palaeogeomorphology and karst distribution of Tongwan unconformity in Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 516-521.
- [13] 程日辉, 林畅松, 刘景彦. 盆地研究中不整合成因分析[J]. 世界地质, 1998, 17(3): 23-27.
- CHENG Rihui, LIN Changsong, LIU Jingyan. The analysis of unconformity origin in the sedimentary basin[J]. *Global Geology*, 1998, 17(3): 23-27.
- [14] 许效松, 杜佰伟. 碳酸盐岩地区古风化壳岩溶储层[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(3): 1-7.
- XU Xiaosong, DU Baiwei. The palaeoweathering crust type karst reservoir rocks in carbonate rocks[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(3): 1-7.
- [15] 张宝民, 刘静江. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 12-29.
- ZHANG Baoming, LIU Jingjiang. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 12-29.
- [16] 夏日元, 邹胜章, 梁彬, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 101-107.
- [17] 侯方浩, 方少仙, 王兴志, 等. 四川盆地震旦系灯影组天然气藏储渗体的再认识[J]. 石油学报, 1999, 20(6): 16-21.
- HOU Fanghao, FANG Shaoxian, WANG Xingzhi, et al. Further understandings of the gas-reservoir rocks of Sinian Dengying formation in Sichuan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 20(6): 16-21.
- [18] 何金有, 贾承造, 邬光辉, 等. 新疆阿克苏地区震旦系风化壳古岩溶特征及其发育模式[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2513-2518.
- HE Jinyou, JIA Chengzao, WU Guanghui, et al. Characteristic and model of Sinian weathering paleo-karst in Aksu area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2513-2518.
- [19] SALLER A H, BUDD D A, HARRIS P M. Unconformities and porosity development in carbonate strata: ideas from a Hedberg Conference[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(6): 857-872.
- [20] 司马立强. 碳酸盐岩缝—洞性储层测井综合评价方法及应用研究[D]. 成都: 西南石油学院地球科学与技术学院, 2005.
- SIMA Liqiang. Study on methods for comprehensive assessment on logging of fractured-vuggy carbonate reservoirs and their application[D]. Chengdu: School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, 2005.
- [21] 刘鸿允, 董榕生, 李建林, 等. 论震旦系划分与对比问题[J]. 地质科学, 1980, 20(4): 307-321.
- LIU Hongyu, DONG Rongsheng, LI Jianlin, et al. Problems of classification and correlation of the Sinian system[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1980, 20(4): 307-321.
- [22] 刘家洪, 杨平, 汪正江, 等. 黔北震旦系灯影组顶部古风化壳特征及油气意义[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 931-938.
- LIU Jiahong, YANG Ping, WANG Zhengjiang, et al. Paleo-weathering crust at the top of Sinian Dengying formation in northern Guizhou and its petroleum exploration significance[J]. *Geology China*, 2012, 39(4): 931-938.

- [23] 朱起煌. 碳酸盐岩古岩溶的发育模式、演化特点及储层特征[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(2): 188-196.
ZHU Qihuang. The development model, evolution characters and reservoir types of palaeo-karst facies of carbonate rock [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1993, 14(2): 188-196.
- [24] 金涛, 罗传容, 吴亚军. 岩溶作用对沙雅隆起奥陶系碳酸盐岩储集层的控制作用[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(1): 27-32.
JIN Tao, LUO Chuanrong, WU Yajun. Controls of karstification on the Ordovician carbonate reservoirs of the Xayar Uplift in Xinjiang [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21(1): 27-32.
- [25] 汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 10-14.
- [26] 许海龙, 魏国齐, 贾承造, 等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 406-416.
XU Hailong, WEI Guoqi, JIA Chengzao, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnvsu paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 406-416.
- [27] 曹瑞骥. 我国中新元古代地层研究中若干问题的探讨[J]. 地层学杂志, 2000, 24(1): 1-7, 35.
CAO Ruiji. Discussion on some problems in the Mesoproterozoic and Neoproterozoic stratigraphical study in China [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(1): 1-7, 35.

(编辑 修荣荣)