

四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测

李启桂,李克胜,周卓铸,燕继红,唐欢阳

(中国石化 勘探南方分公司研究院,四川 成都 610041)

摘要:四川盆地震旦系灯影组风化壳岩溶储层的分布主要受桐湾期不整合面古地貌的古高地、古斜坡的控制。利用全盆的地震格架大剖面解释资料和钻井资料,结合厚度印模法,恢复了桐湾不整合面古地貌,古地貌特征呈西北高、中部斜坡、东南洼的格局。综合利用野外、钻井、地震等资料,深入分析灯影组溶蚀孔洞发育特征和有利岩溶发育带。结果表明,岩溶风化壳溶蚀孔洞发育,广泛发育3个岩溶作用带,岩溶作用厚度呈东薄西厚的变化趋势;岩溶有利发育分布区和较发育分布区主要分布在古岩溶斜坡的地貌位置,以自贡—广安—达县—通江县一线为好,局部发育分布区位于古岩溶高地及古岩溶洼地的地貌位置,分布在成都—资阳地区、绵阳—广元地区及川东南一带。

关键词:古地貌;碳酸盐岩;岩溶储层;桐湾不整合;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Palaeogeomorphology and karst distribution of Tongwan unconformity in Sichuan Basin

Li Qigui, Li Kesheng, Zhou Zhuozhu, Yan Jihong, Tang Huanyang

(Exploration Southern Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The distribution of weathering crust karst reservoirs of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin is mainly controlled by palaeo-highlands and palaeo-slopes of unconformity produced by the Tongwan Movement. Based on the interpretation of the cross-basin seismic profile and drilling data, this paper restored the palaeogeomorphology of Tongwan unconformity by using printing method. The palaeogeomorphology features in a framework consisting of the northwestern high, central slope and southeastern sag. Outcrop, drilling and seismic data were integrated to study the development characteristics of the solution cavities and pores and predict favorable karst reservoirs in the Dengying Formation. It is concluded that solution cavities and pores are well developed in the karst weathering crust with three widely distributed karst belts. The karst is thick in the west and thin in the west. The favorable and fair karst belts occur on the palaeo-karst slopes, such as Zigong-Guangan-Daxian-Tongjiang. And the local karst belts occur on the palaeo-karst high and in the palaeo-karst sag, such as Chengdu-Ziyang, Mingyang-Guangyuan as well as the south-eastern part of Sichuan Basin.

Key words: palaeogeomorphology, carbonate rock, karst reservoir, Tongwan unconformity, Sichuan Basin

1964年,在威远构造上通过加深威基井至震旦系灯影组顶部(2 438.65 m)发生井漏井喷,用8 mm油嘴测试获日产气 $7.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产水 121.2 m^3 ,发现了震旦系威远气藏。继后,又在龙女寺、高石梯、长宁及盆地边缘的大两会、曾家河、南山岭、林滩场等构造上进行钻探,钻井包括川北的强1、曾1、曾2井,川西的周公1、老龙1井,川南的宁1、宁2井,川东的鄂参1井,川东南的丁山1、林1井,及川中的安平1、高科1、高石1、女基井等。

多年的勘探成果表明,除在川中古隆起发现了威远震旦系气田、资阳震旦系气藏和高石1井高产井外,

在周缘目前还无重大的突破。这说明了震旦系储层地质特征和成藏条件的复杂性。通过对川中的安平1、高石1井及周缘的林1、丁山1、利1井震旦系的研究发现,其储层类型有孔洞型、裂缝型和裂缝-孔洞型。总的来说,四川盆地震旦系灯影组白云岩基质孔隙度普遍较低,但岩溶孔洞发育,灯影组全直径孔隙度高于基质孔隙度2~3倍^[1-2]。这表明,储层除受自身岩石性质、内部结构等内在因素的影响以外,还受到古气候、海平面升降、构造运动和古隆起等外部因素的制约,尤其跟古地貌息息相关^[3-4]。因此,深入研究桐湾期不整合面的古地貌与碳酸盐岩地层的岩溶分布,可

以为加快四川盆地地下组合油气勘探提供重要依据。

1 桐湾不整合面古地貌

四川盆地在长期的发展过程中,受周边板块构造活动与区域性海侵、海退事件的影响,盆地内部可识别9个不整合面,包括 Z/AnZ, ϵ/Z , O/ ϵ , D/S, P_1/AnP , P_2/P_1 , T_3/T_2 , J/T 和 K/J。从地层沉积演化上可以看出,不整合的范围在四川盆地不同构造单元分布不相同,在盆-山耦合处存在多个不整合面。其中,桐湾不整合面为寒武系与震旦系(ϵ/Z)之间的界面,代表了桐湾运动,寒武系与震旦系为不整合接触,寒武系从东、西两侧向川中乐山-龙女寺古隆起方向减薄。

震旦纪末的桐湾运动表现为大规模抬升,灯影组上部广泛遭受剥蚀^[2,5-8],造成震旦系与寒武系呈假整合接触关系。桐湾运动结束后,早寒武世上扬子区全区沉降,海水自东南方侵入本区,早期沉积了筇竹寺组(牛蹄塘组)黑色炭质页岩和粉砂质页岩,厚度为50~200 m,沉积环境为强还原的浅海盆地;中、晚期逐渐过渡为含砂质页岩,砂、泥岩互层,晚期为灰色白云岩与灰岩组合,沉积环境属局限台地-开阔台地。中-晚寒武世,沉积了浅灰、深灰色粉晶云岩、细-中晶云岩、藻云岩及泥质白云岩,大面积出现半局限台地-潟湖相的沉积环境。

对于桐湾不整合面古地貌的恢复,我们采用厚度印模法,在灯影组古风化壳上覆地层中寻找一个比较准确的代表古海平面的地层界面即中-上寒武统,然后通过该沉积界面与风化壳间的地层厚度来求取风化壳上地形的相对高低,从而恢复其古地貌。此方法相当于使用沉积层底面上泥裂、波痕的印模来恢复下伏地层顶面上的泥裂、波痕的起伏形态,因此又称之为厚度印模法^[9-12]。

由于具有明确地震反射特征的等时层离风化壳界面越近越能准确反映古地形特征,而本区下寒武统主要为黑色炭质页岩、粉砂质页岩及砂、泥岩互层,与上覆的中-上寒武统粉晶云岩、细-中晶云岩、藻云岩及泥质白云岩在岩性上差异显著,地震响应特征明显、易于追踪,结合研究区的地震资料品质,我们选择了中寒武统底面为等时面制作古地貌图(图1)。

综合地震构造解释及区域构造背景分析,我们把中寒武统底界作为一等时界面进行层拉平消除后期构造运动的影响,通过压实校正,即可反映古地貌的高低。选择地层最厚的点作为初始点,利用这个厚度减去其他点的厚度,其值就可以反映古地貌的相对高程,从而恢复出四川盆地震旦系灯影组沉积末期岩溶古地貌图(图2)。从图2可以看出,古地貌呈中西高、南东低的态势,相对高差最大约1000 m;最高处位于川中及川西大部,而东南部地区的相对低。因此,根据其地貌特征自西向东依次可以划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地。古地形总体表现为西北高、中部斜坡、东南洼的格局。其中,古岩溶高地位于成都-资阳地区、邛崃-乐山地区及绵阳-广元地区;古岩溶斜坡位于自贡-广安-达县-通江县一线,其中自贡-广安、南充-三台为一级斜坡,仪陇-巴中为二级斜坡,一级斜坡和二级斜坡高差约为300 m,古岩溶洼地位于川东-川东南一带。

2 震旦系灯影组岩溶发育特征

由于受震旦纪晚期的桐湾运动影响,四川盆地发生区域性抬升剥蚀,震旦系遭受大气降水淋滤溶蚀,形成分布广泛的岩溶缝洞,加上后期的构造作用和溶蚀改造作用,造就成四川盆地灯影组岩溶型储层。

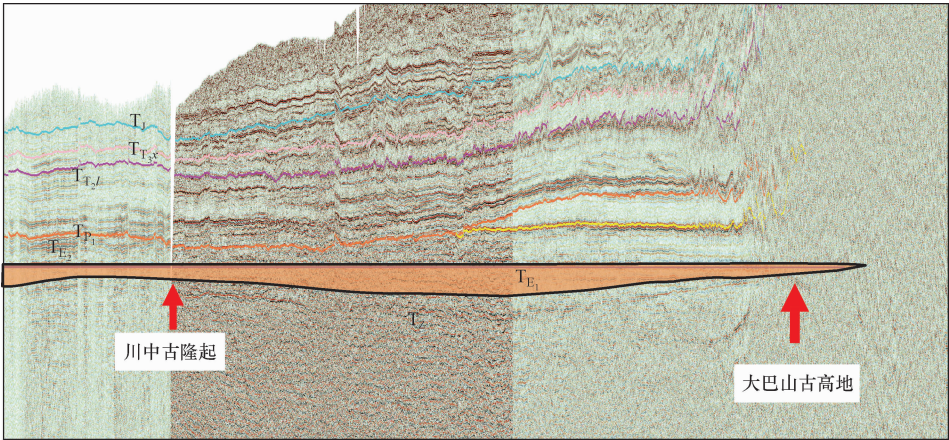


图1 四川盆地中寒武统底面等时面底层拉平图

Fig.1 Seismic profile by flattening the bottom of the Middle Cambrian in the Sichuan Basin
 T_1 : 侏罗系底界; T_{T_3} : 上三叠统须家河组底界; T_{T_2} : 中三叠统雷口坡组底界; T_{P_1} : 二叠系底界;
 T_{E_2} : 中寒武统底界; T_{E_1} : 寒武系底界; T_Z : 震旦系底界

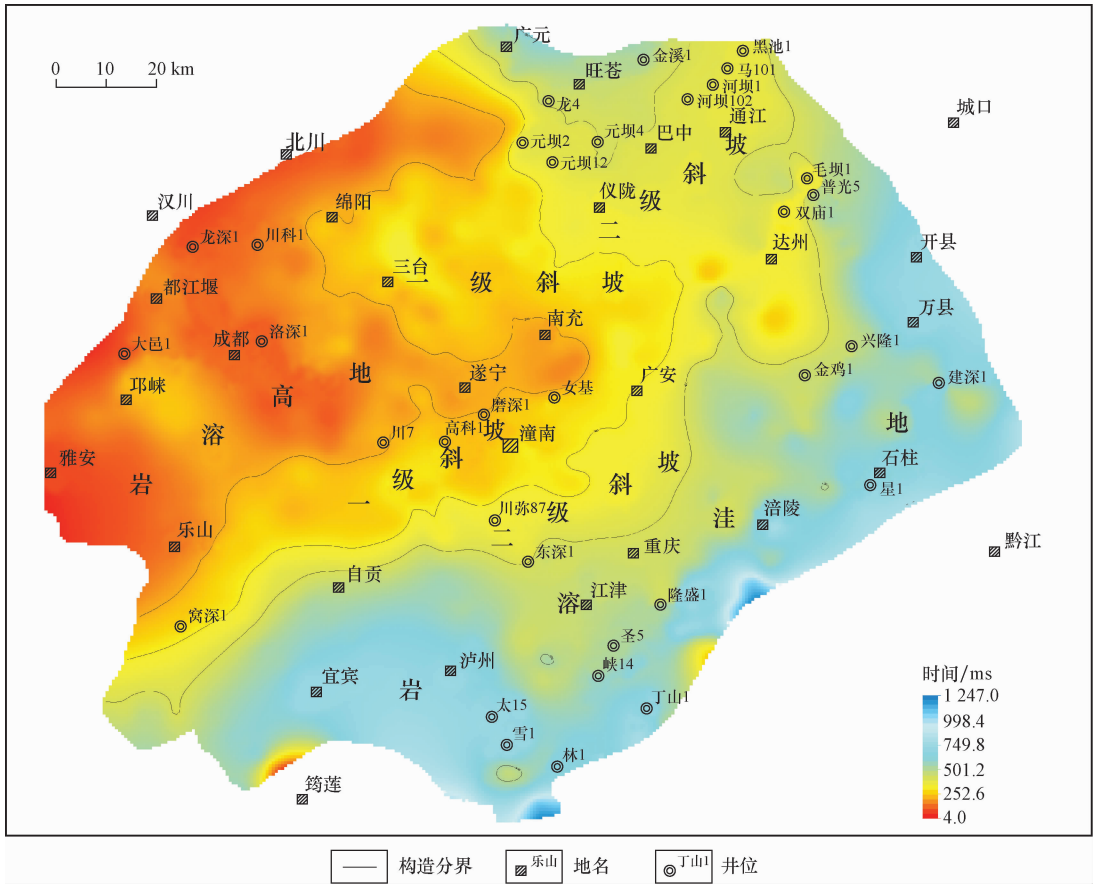


图 2 四川盆地寒武系沉积前古岩溶地貌

Fig. 2 Palaeokarst geomorphology of the Sichuan Basin before the Cambrian

2.1 发育古岩溶不整合面,形成溶蚀孔洞储层

由于桐湾运动导致四川盆地构造抬升,上震旦统灯影组暴露于大气环境下,碳酸盐岩受到风化作用剥蚀,使得部分地区缺失灯(灯影组)四段。同时,在残余地层中形成了大型洞穴、溶蚀孔洞和高角度溶缝等典型的岩溶特征。其充填物有泥质、岩溶角砾、溶积砂岩和溶积泥岩等,均指示了风化壳岩溶作用的发生(图 3)。其溶蚀孔洞充填物的微量元素主要表现为低 Fe, Mn 和 Na 含量,碳、氧同位素表现为 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB,‰) 在

零值附近, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB,‰) 偏负,反映了大气成岩环境。

2.2 风化壳岩溶厚度呈东薄西厚特点

根据前人对威远 61 口产气井的统计^[2], 其中在 0~12 m 深度内仅有 1 口气井; 12~23 m 深度内有 17 口气井, 占总井数的 27.80%; 23~43 m 深度内分布有 10 口气井, 占总井数的 16.30%; 43~80 m 内有 33 口气井, 占总井数的 54.27%。因此, 12~23 m 层段和 43~80 m 层段表现为储层相对发育段。储层的层位除少量分布在灯四段外, 绝大多数储层分布在灯三段

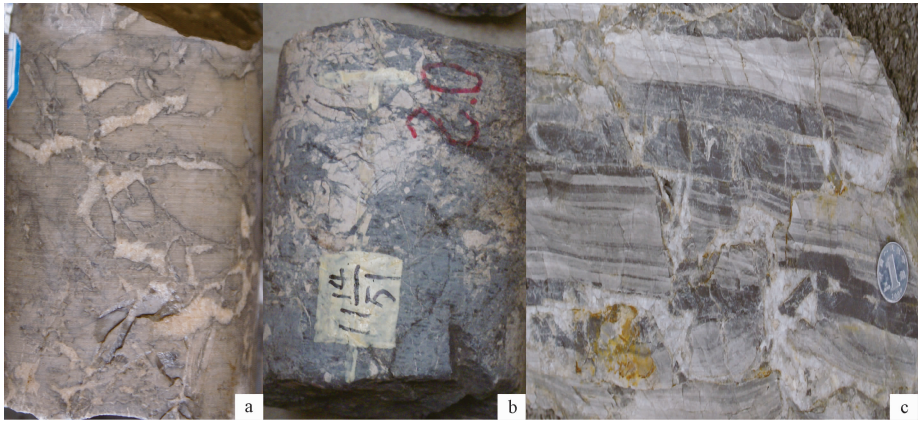


图 3 四川盆地震旦系灯影组沉积末期风化壳岩溶宏观识别标志

Fig. 3 Macro marks of weathering crust karst at the end of the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin

a. 岩溶角砾,分选差,丁山 1 井,3 565.66 m; b. 岩溶角砾,林 1 井,2 655m; c. 洞穴充填角砾云岩,麦地坪剖面,上贫藻层,200 m

至灯二段上部。而安平 1 井取心段仅有 28.07 m,但从测井解释看,良好的储层分布在距震旦系顶 6.6 m 处^[8]。位于川西南的金石 1 井实钻结果表明,在灯影组不整合面下 100 m 处才见溶蚀孔洞;而位于川东南的林 1 井是在不整合面下 60 m 处见溶蚀孔洞。总的来说,纵向上溶蚀孔洞发育层位主要分布在灯三段中、下部至灯二段中、上部层段之内,距震旦系顶 10 ~ 100 余 m 深度。从其平面分布看,溶蚀孔洞的发育深度从川中隆起往川西南及川东南等周边有逐步加深的规律,古岩溶地貌呈西北隆、中部斜坡、东南洼的趋势,从而导致岩溶作用深度呈东薄西厚的变化趋势,如高石 1 井钻遇的岩溶储层厚 275 m,金石 1 井钻遇的岩溶储层厚 269.8 m,而到东部的林 1 井和丁山 1 井岩溶作用厚度一般为 80 ~ 110 m。以上表明,桐湾不整合面对于其下伏岩溶带的发育具有很好的控制作用,缝、洞主要分布在震旦系顶以下的地层中,风化壳岩溶厚度呈东薄西厚的特点。

2.3 灯影组风化壳广泛发育 3 个岩溶作用带

从四川盆地钻井及周缘露头剖面研究来看,震旦纪末期的风化壳岩溶作用特征明显,均可划分出 3 个岩溶作用带,即垂直渗流岩溶带、水平潜流岩溶带及深部缓流岩溶带。其中,丁山 1 井井深 3 495.0 ~ 3 508.7 m 发育垂直渗流岩溶带,厚 13.7 m;在井深 3 508.7 ~ 3 564.7 m 发育水平潜流岩溶带,厚 56.0 m;在井深 3 564.7 ~ 3 583.0 m 发育深部缓流岩溶带,厚 18.3 m。从遵义松林剖面上震旦统风化壳岩溶剖面看,在距顶层段 342 ~ 364 m 处发育垂直渗流岩溶带,厚 22 m,发育高角度扩溶缝,沿裂缝发育有串珠状溶孔,溶蚀孔洞呈长条状;在距顶层段 298 ~ 342 m 处发育水平潜流岩溶带,厚 44 m,该岩溶带充填作用不强烈,孔洞保存较好;在距顶层段 282 ~ 298 m 处发育深部缓流岩溶带,厚 16 m,该岩溶带岩溶作用不强烈,仅发育少量溶孔,且多数被白云石充填(图 4)。

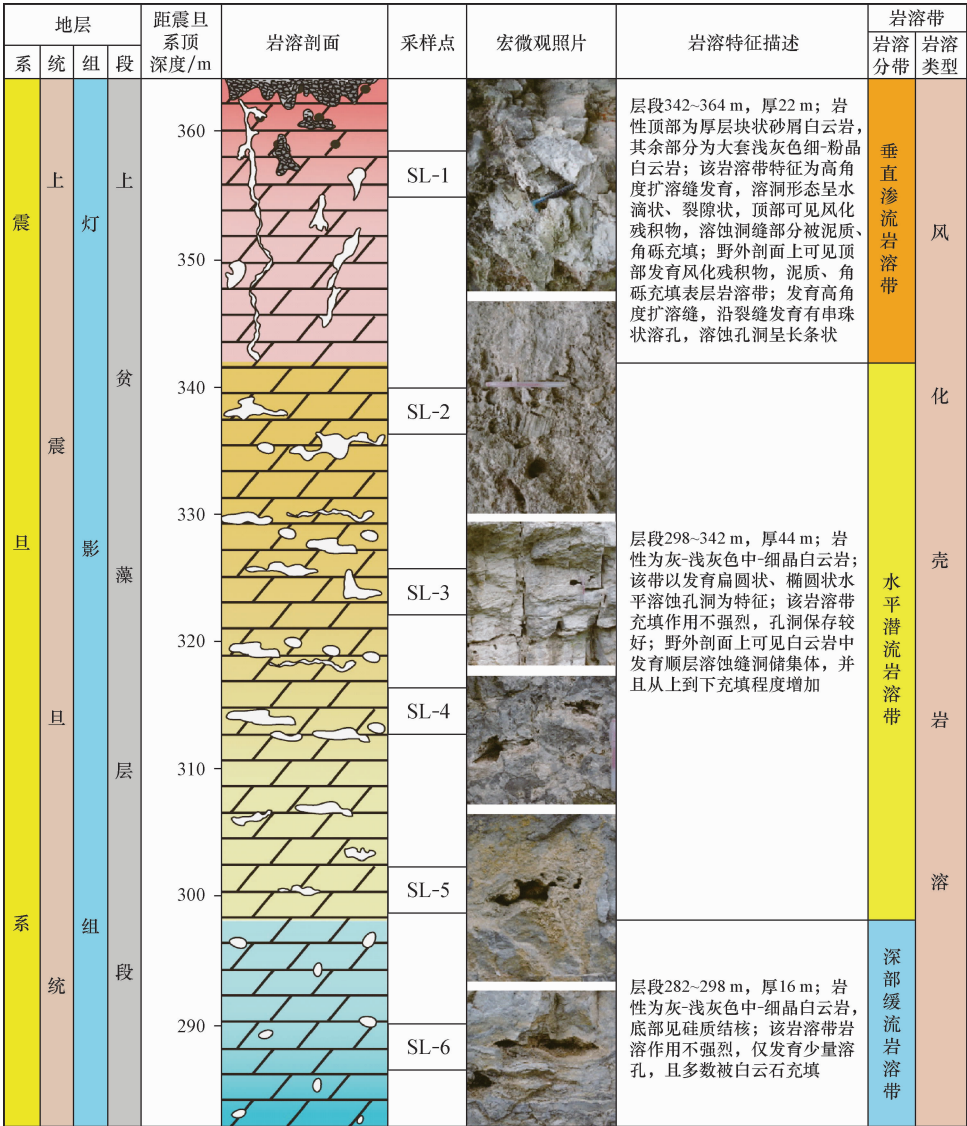


图 4 遵义松林剖面灯影组风化壳岩溶剖面及岩溶带划分

Fig. 4 Weathering crust karst profile and karst belt division of the Dengying Formation in Songlin profile, Zunyi area

3 灯影组岩溶储层分布预测

通过对四川盆地震旦系灯影组岩溶发育特征及地震相的分析发现,古地貌与古岩溶的分布关系密切(图 5)。处在岩溶高地的川中—川东一带(即自贡—广安—达县—通江县—一线),岩溶水除垂向渗入外,以水平运动为主,岩溶孔隙发育,地震响应特征上孔洞裂缝表现为亮点、强峰、强谷的反射特征,如南江西 EW578 测线地震剖面就表现出这种明显特征(图 6a);大型溶洞则常表现为强串珠状反射。模型

能量不连续、出现复波分叉合并的特征,反演剖面为低速异常。

处于一级及二级岩溶斜坡的川中—川东一带(即自贡—广安—达县—通江县—一线),岩溶水除垂向渗入外,以水平运动为主,岩溶孔隙发育,地震响应特征上孔洞裂缝表现为亮点、强峰、强谷的反射特征,如南江西 EW578 测线地震剖面就表现出这种明显特征(图 6a);大型溶洞则常表现为强串珠状反射。模型

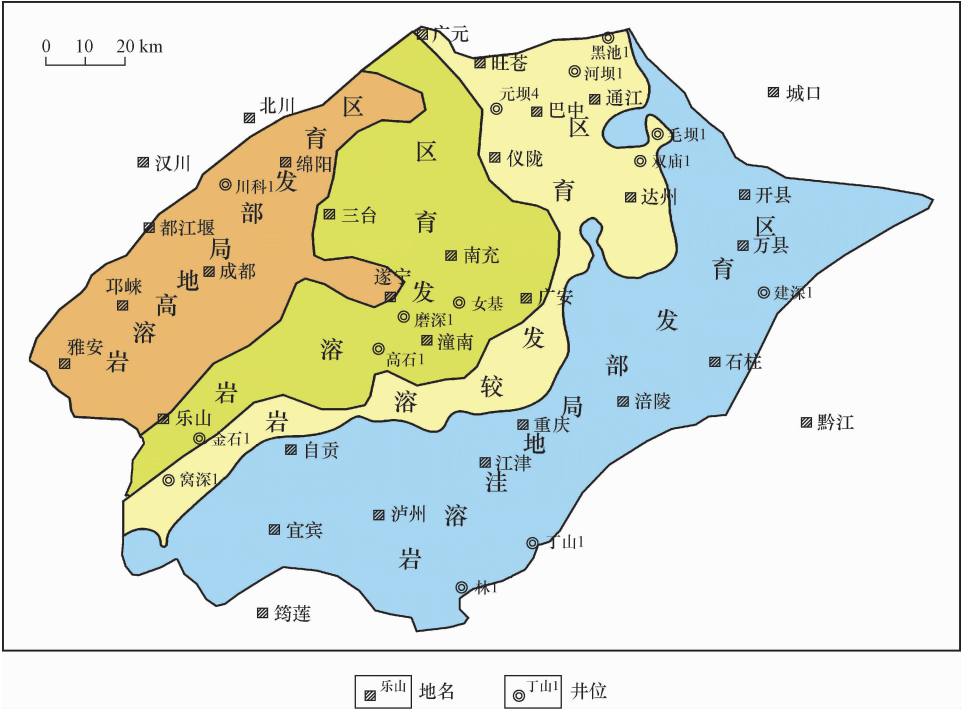


图 5 四川盆地震旦系灯影组岩溶分布预测

Fig. 5 Karst distribution forecast of the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin

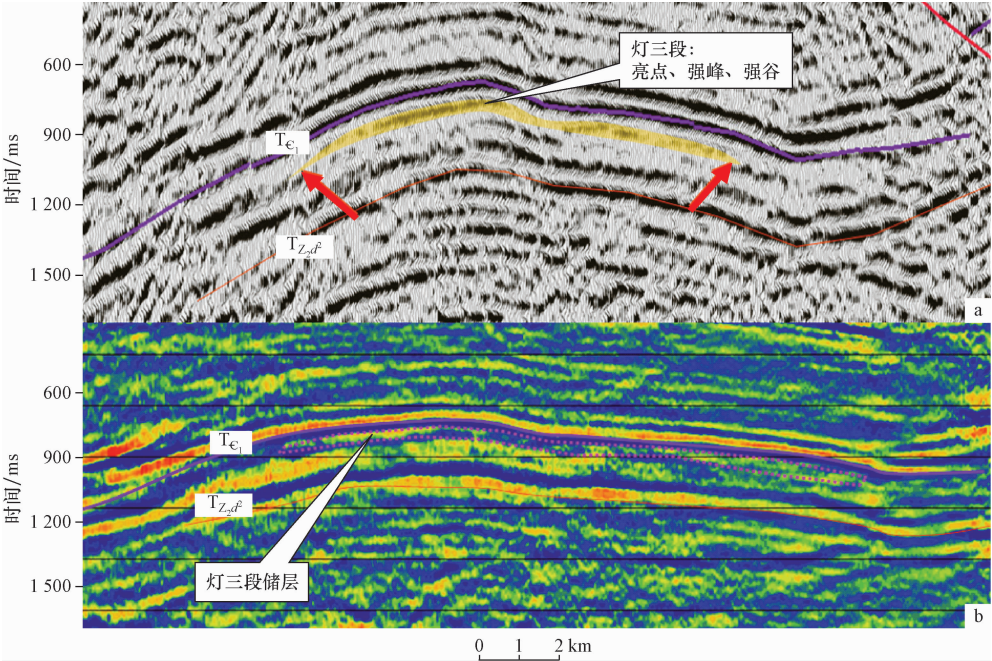


图 6 南江西 EW578 地震剖面桐湾构造运动面下的岩溶标定

Fig. 6 Karst demarcation under the surface of Tongwan Movement on seismic line EW578 in western Nanjiang area

a. 地震剖面;b. 波阻抗反演剖面

正演表现为紧靠强波峰平亮点特征,反演剖面为平亮点低速异常(图6b)。另外,在二级岩溶斜坡的川东北马路背地区 Line1620 测线的速度反演剖面亦存在灯四段岩溶低速异常体。因此,岩溶斜坡的灯影组岩溶储层表现为“高速背景中的相对低速异常”。

处于岩溶洼地的川东南、川东一带,属于排泄区,其溶蚀孔缝局部发育,地震及反演剖面表现为透镜状外形,顶部能量不连续、出现复波分叉合并的特征,反演剖面为低速异常。

总之,古岩溶在斜坡地貌的岩溶作用较为强烈,具有岩溶厚度大、溶孔充填物少的特点,目前已在该区的威远、安平1井和高石1井等的震旦系获高产气流,尤其是高石1井处在第一岩溶斜坡上,在震旦系灯影组钻遇275 m厚的岩溶储层,并获得 $102 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产量,表明岩溶发育、储集条件优越。而处于岩溶洼地的丁山1井和林1井灯影组风化壳岩溶,岩心上虽发育溶蚀孔洞,但已被白云石全充填(并见少量沥青),成像测井图表现为暗斑相特征,储层以Ⅱ类和Ⅲ类储层为主,储层类型主要为裂缝-孔洞型,表明处于岩溶洼地,风化壳岩溶充填作用较强,孔洞连能性差,储层非均质性强。

参 考 文 献

[1] 徐世琦,李天生. 四川盆地加里东古隆起震旦系古岩溶型储层的分布特征[J]. 天然气勘探与开发,1999,22(1):14-18.
Xu Shiqi, Li Tianshen. Distribution features of Paleokarst reservoirs of Sinian in Caledonian Uplift in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1999, 22(1): 14-18.

[2] 王兴志,穆曙光,方少仙. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J]. 沉积学报,2000,18(4):549-554.
Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian. Evolution of pores during the course of Sinian dolomites diagenesis in south-western area of Sichuan Basin[J]. Sedimentary Journal, 2000, 18(4): 549-554.

[3] 洪余刚,陈景山,代宗仰,等. 古地貌恢复在风化壳岩溶型储层研究中的应用——以川中—川南过渡带奥陶系为例[J]. 大庆石油地质与开发,2007,26(1):1-5.
Hong Yugang, Chen Jingshan, Dai Zongyang, et al. Application of paleo-topography restoration technique in researching weathered crust karst reservoirs[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2007, 26(1): 1-5.

[4] 王萍,袁向春,李江龙,等. 塔河油田4区古地貌对储层分布的影响[J]. 石油与天然气地质,2011,31(3):382-387.
Wang Ping, Yuan Xiangchun, Li Jianglong, et al. Control of paleogeomorphology on reservoir distribution in Block 4 of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 382-387.

[5] 宋光永. 川东南地区上震旦统灯影组热液白云岩特征[D]. 四川,成都:成都理工大学,2010.
Song Guangyong. Features of hydrothermal dolomites of Dengying Formation of Sinian in south-eastern area of Sichuan Basin[D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2010.

[6] 曹婷婷,徐思煌,王约,等. 四川盆地南江杨坝地区下寒武统烃源岩形成的地球生物学条件[J]. 石油与天然气地质,2011,32(1):11-16.
Cao Tingting, Xu Sihuang, Wang Yue, et al. Geobiological conditions for the formation of the Lower Cambrian source rocks in Yangba area of Nanjiang County in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 11-16.

[7] 马文辛,刘树根,黄文明,等. 四川盆地东南缘志留系古油藏特征及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):432-441.
Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Characteristics of Silurian Paleo-oil reservoirs and their significance for petroleum exploration on the southeast margin of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 432-441.

[8] 李国辉,李翔,杨西南. 四川盆地加里东古隆起震旦系气藏成藏控制因素[J]. 石油与天然气地质,2000,21(1):80-83.
Li Guohui, Li Xiang, Yang Xi'nan. Factors controlling gas reservoiring in Sinian in Caledonian Uplift in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 80-83.

[9] 徐国强. 塔里木盆地早海西期风化壳岩溶洞穴层研究[D]. 四川,成都:成都理工大学,2007.
Xu Guoqiang. Researches on early Hercynian weathering crust karst pores in Tarim Basin[D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2007.

[10] 肖朝晖,王招明,姜仁旗,等. 塔里木盆地寒武系碳酸盐岩层序地层特征[J]. 石油与天然气地质,2011,32(1):1-10.
Xiao Zhaohui, Wang Zhaoming, Jiang Renqi, et al. Sequence stratigraphic features of the Cambrian carbonate rocks in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 1-10.

[11] Huang L J, Fehler M C, Wu R S. Extended local Rytov Fourier migration method[J]. Geophysics, 1999, 64: 1535-1545.

[12] Chen Q, Sidney S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring[J]. The Leading Edge, 1997, 16(5):445-456.

(编辑 李 军)