

# 古地貌恢复在岩溶风化壳储层研究中的应用 ——以川中磨溪地区灯影组四段为例

朱茂<sup>1</sup>, 沈安江<sup>1</sup>, 曾洪流<sup>2</sup>, 李文正<sup>1</sup>, 谷明峰<sup>1</sup>, 田瀚<sup>1</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 得克萨斯大学奥斯汀分校杰克逊地球科学学院

**摘要** 受桐湾运动影响,四川盆地震旦系灯影组发育大规模风化壳岩溶作用。以川中磨溪地区灯四段为例,基于三维地震和钻井、测井资料,分别应用残余厚度法和印模法对灯四段岩溶古地貌进行恢复。对2种方法的结果进行综合分析,按台内带和台缘带精细刻画了灯四段的岩溶古地貌:由东南向西北倾伏,局部存在岩溶高点;根据实际地质条件把岩溶斜坡细分为岩溶缓坡、台缘高点、岩溶陡坡,全区共划分出岩溶台地、岩溶缓坡、台缘高点、岩溶陡坡和岩溶谷地等5种地貌单元。沉积相带、岩溶古地貌和断裂系统共同控制了岩溶储层的发育和分布。台内带:岩溶台地储集空间多为针孔及较小的溶蚀孔洞,整体质量较差,溶蚀作用最弱;岩溶缓坡溶蚀作用较强,储集空间以大的溶蚀孔洞为主。台缘带:岩溶斜坡储集空间主要为蜂窝状溶蚀孔洞,溶蚀作用最强,岩溶强度受断裂控制。结果表明:台缘带断裂系统发育的岩溶斜坡是高质量岩溶储层最有利的发育区,台内带低勘探程度的岩溶缓坡也可作为下一步有利勘探区带。

**关键词** 四川盆地;磨溪地区;震旦纪;灯影组;岩溶古地貌;岩溶储层

**中图分类号**: TE122.2

**文献标识码**: A

## 0 引言

风化壳岩溶储层作为全球含油气盆地最重要的碳酸盐岩储层之一,一直是国内外研究的热点<sup>[1-5]</sup>。近年来,在中国鄂尔多斯盆地、塔里木盆地和四川盆地等相继发现的大型海相油气田大多与古风化壳岩溶储层有关,储层储集空间类型为裂缝-溶蚀孔洞型、裂缝-洞穴型和裂缝型等<sup>[6-11]</sup>。岩溶古地貌控制着有利储层的发育部位,在控制碳酸盐岩次生储集空间的形成和展布方面起着决定性作用,而开展岩溶储层油气勘探的一大关键点就在于岩溶古地貌的恢复<sup>[12-16]</sup>。

四川盆地磨溪地区震旦系灯影组四段(以下简称灯四段)近年来取得了巨大的勘探进展。前人研究表明,灯四段顶部发育一套丘滩相白云岩,受桐湾运动Ⅱ幕影响而抬升暴露,并接受大气淡水溶蚀淋滤,形成该地区最为有利的储层<sup>[17-20]</sup>。这种滩

控岩溶储层非均质性极强,储层质量横向变化大。为进一步明确磨溪地区优质储层的分布,本文在充分利用研究区岩心、测井资料及三维地震资料的基础上,分别运用残余厚度法和印模法恢复了灯四段顶部的岩溶古地貌,比较了这2种方法的优缺点,并进一步讨论了古地貌与灯四段有利岩溶储层发育分布的关系,这将为勘探选区提供新方向,并为其他地区的岩溶储层预测提供新的思路和方法。

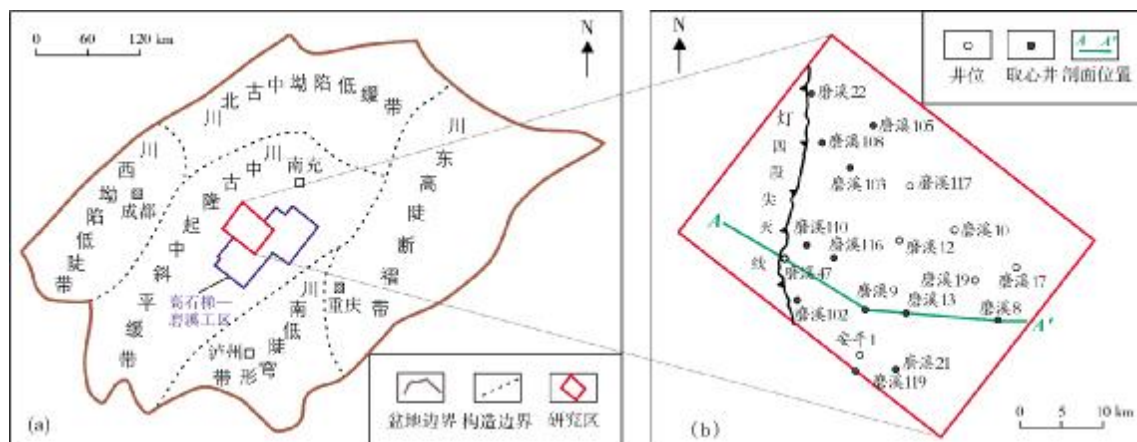
## 1 区域地质背景

磨溪地区构造上处于四川盆地川中古隆起中斜平缓带中部(图1a),总面积约1200 km<sup>2</sup>。研究区内钻遇灯四段的钻井共有19口(图1b),平面分布相对均匀,其中取心井共计12口,总心长约432 m,三维地震满覆盖,这些为古地貌恢复研究提供了坚实的资料基础。

收稿日期: 2018-03-05; 改回日期: 2018-08-02

本文受中国石油杭州地质研究院与美国得克萨斯大学奥斯汀分校合作项目“四川GM地区碳酸盐岩地震沉积学研究”(编号: UTA16-001258)资助

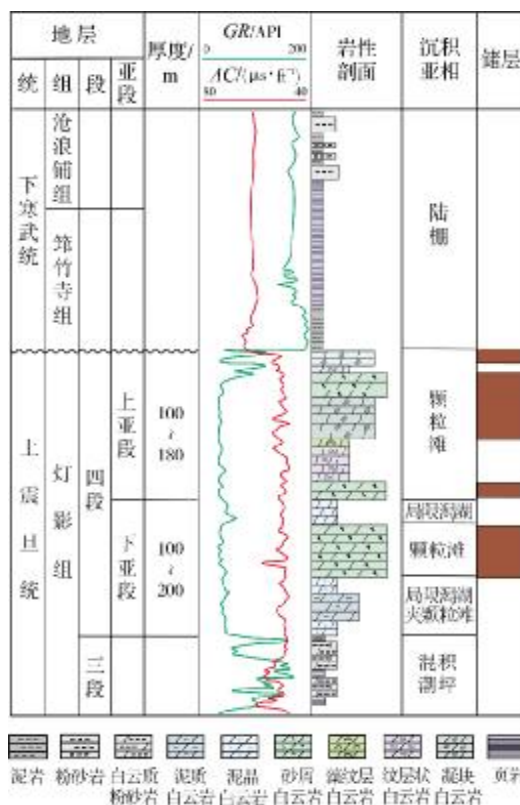
朱茂: 1988年生,硕士,工程师,主要从事石油地质及地震沉积学方面的研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号杭州地质研究院; E-mail: zhuma\_hz@petrochina.com.cn



桐湾运动发生在灯影组沉积早期,在沉积末期活动最为强烈<sup>[2]</sup>。在桐湾运动Ⅱ幕差异抬升作用下,灯四段出露地表,经历了大气水影响的表生风化作用阶段,导致灯四段顶面发生了不同程度的暴露剥蚀和冲刷,并接受淋滤而形成大量的溶蚀孔洞和溶蚀缝等优质的储集空间。

## 2 灯四段顶部岩溶储层特征

在桐湾运动Ⅱ幕的影响下,灯四段碳酸盐岩抬升暴露,接受岩溶改造,在研究区12口井的岩心中见到大量的溶洞、溶缝及岩溶垮塌形成的岩溶角砾



岩溶孔洞及溶缝中充填的物质构成、含量不同,会造成顶部岩溶储层段与其下伏储层的测井响应特



图3 川中磨溪地区灯四段上亚段岩心典型岩溶特征

征显著不同。由于灯四段上覆筇竹寺组泥页岩,灯四段岩溶孔洞、溶蚀缝中常充填泥质及岩溶角砾,在测井曲线上表现为高伽马特征(图4),并且孔洞及裂缝发育会造成声波时差变大,井径增大。

在钻井过程中岩溶储层段往往会出现井漏,录井过程中常见气测异常,这是岩溶储层的重要特征之一。根据研究区钻录井资料统计及邻区资料调研,发生漏失的层段主要在震旦系顶界以下50~100 m范围,且90%以上的井见到气测异常。研究区磨溪22井和磨溪105井有井漏显示,磨溪22井顶部钻井液漏失量达29.6 m<sup>3</sup>。

桐湾运动Ⅱ幕造成灯四段差异抬升剥蚀而形成高低不平的侵蚀面。在震旦系顶界面之下,灯影组地震同相轴表现出削截的特征(图5),在界面之上存在着寒武纪地层超覆现象,这些地层超覆点应该是地层坡折带的反映<sup>[21]</sup>。

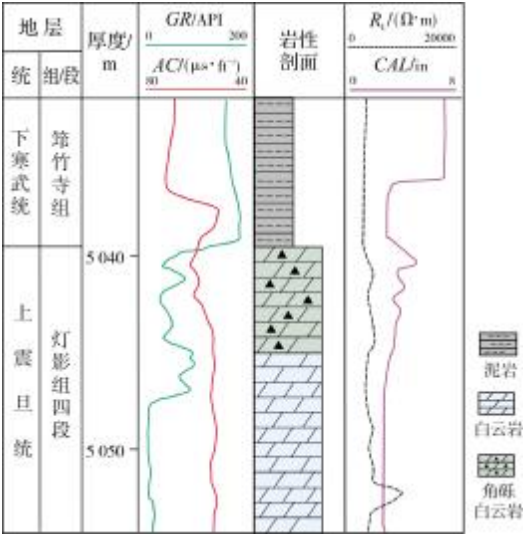
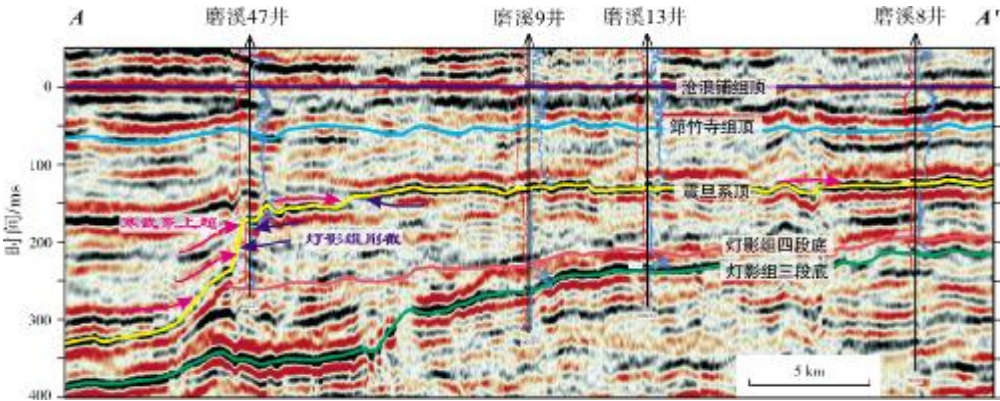


图4 川中磨溪地区安平1井灯四段顶部岩溶风化壳测井响应特征



剖面位置见图1b;沧浪铺组顶拉平

图5 川中磨溪地区连井地震解释剖面

### 3 岩溶古地貌恢复

#### 3.1 古地貌恢复方法分析

古地貌决定了古岩溶的深度、范围及强度。古地

貌恢复对于认识研究区岩溶储层发育规律,寻找有利区带有着重要的指导意义。目前常用的古地貌恢复手段有很多,概括起来主要有印模法、残余厚度



法、层拉平法、沉积学分析法和层序地层学古地貌恢复法等<sup>[22-24]</sup>。这些方法各有优缺点,在实际研究工作中,通常要考虑工区的资料情况和地质条件,综合分析,取长补短。

前人对四川盆地灯影组的研究较多,大多聚焦于盆地大尺度。对于磨溪地区灯四段,由于勘探时间较短,且受制于资料、沉积相及层序地层学研究程度,沉积学分析及层序地层学方法等并不适用。考虑到研究区内高品质三维地震资料丰富且钻井分布大致均匀,本次研究主要应用了残余厚度法和印模法对磨溪地区灯四段岩溶古地貌进行恢复,并对2种结果进行对比讨论。

### 3.2 残余厚度法古地貌恢复

残余厚度法的基本理论是,假设目的层剥蚀之前的原始沉积厚度变化不大,选取目的层之下的某个标志层作为等时基准面,将其拉平,则该面以上残余厚度的大小代表了古地貌的形态;残余厚度值大的区域代表了古地貌低势区,残余厚度值小的区域就是古地貌高势区。影响残余厚度法应用的关键在于,目的层之下等时基准面的选取,要同时满足原始沉积厚度较为均一、地层分层数据比较可靠等条件。

前人研究认为磨溪地区震旦系灯三段经历了大面积海侵,总体为半局限台地环境<sup>[20]</sup>,其顶面可大致认为是一个等时界面,基本上具备应用残余厚度法恢复古地貌的条件。

灯四段顶、底界面具有明显的岩电特征(图2),在测井图上很容易识别:顶面为碳酸盐岩与泥页岩界面,底面为碳酸盐岩与粉砂岩、泥岩的界面,自然伽马均表现为突变特征。由于井点过于稀疏,不足以控制全区,本次研究充分应用三维地震资料建立地层格架。首先在钻井上地层划分准确后,根据井震结合的原则,利用灯四段地震解释成果,通过三维模型迭代法求取层速度,经过时深转换,分别编制灯四段顶界和灯三段顶界的构造图;然后将灯四段顶界与灯三段顶界相减,得到灯四段残余厚度图(图6)。从图6可以看出,总体上,研究区灯四段残余厚度约240~400 m,呈现西厚东薄的特征。具体看,西北和西南存在两个残余厚度高值区,厚度大于340 m,两个高值区之间被隔开,局部存在孤立的较大厚度区;东部残余厚度最薄,一般在240~300 m之间。

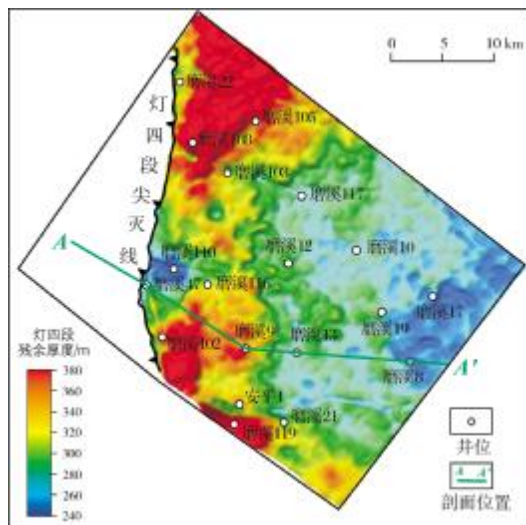


图6 川中磨溪地区灯四段残余地层厚度图

### 3.3 印模法古地貌恢复

印模法基于沉积补偿原理,选择紧邻目的层之上的、对剥蚀地貌有填平补齐性质的地层作为基本面,利用上覆地层与侵蚀顶界面之间的“镜像”关系,通过这两个界面之间的地层厚度来定量恢复古地貌形态;厚度小的地方为古地貌高势区,厚度大的地方为古地貌低势区。印模法应用的关键在于,目的层之上等时界面的选取。该等时界面必须全区分布,且离侵蚀面较近,受后期构造活动的影响小。

四川盆地灯影组上覆的筇竹寺组—沧浪铺组沉积期为一个完整的海侵—海退旋回<sup>[20]</sup>,至沧浪铺组沉积时,基本完成了对灯影组剥蚀古地貌的填平补齐过程。在该时期内研究区构造活动相对稳定<sup>[26]</sup>,因此,可以选取沧浪铺组顶界近似作为古地貌恢复的“等时界面”,利用震旦系顶—沧浪铺组顶印模厚度来反映寒武系沉积前的灯四段古地貌特征。研究区沧浪铺组顶界在地震剖面上表现为强波谷特征(图5),全区稳定分布,可连续追踪,这也为研究区应用印模法恢复古地貌提供了便利。

基于上述分析,经时深转换,得出了震旦系顶—沧浪铺组顶印模地震地层厚度图(图7)。从图7可以看出,研究区西侧裂隙内印模厚度可达800 m;在灯四段尖灭线以东,厚度变化幅度不大,总体呈现从西北向东南阶梯状减薄的特征;东南最薄处仅300 m左右。依据镜像关系,寒武系沉积前东南部为古地貌高,向西北逐渐降低。

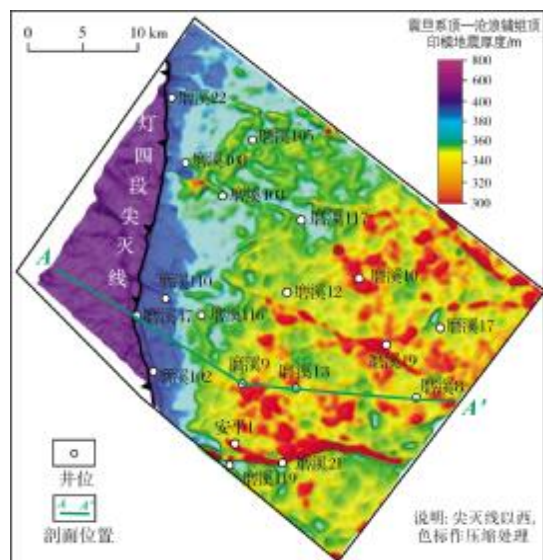


图7 川中磨溪地区震旦系顶—沧浪铺组顶  
印模地震地层厚度

### 3.4 岩溶古地貌综合分析

残余厚度法指示的是区内抬升剥蚀后的灯四段厚度,并不能完全代表灯四段古地貌,但具有参考意义。一方面,研究区灯四段整体上为碳酸盐局限台地相,西部靠近裂隙边缘区域发育台缘丘滩复合体,而东部台内带主要发育潟湖和白云岩坪等,同等条件下台缘带为高能带,沉积厚度更大;另一方面,原始古地貌越高,抬升剥蚀越多,残余厚度就越小。因此残余厚度法可以大致圈定出灯四段台缘丘滩的发育范围,还能更加突出台缘内部细节。研究区西部台缘丘滩发育区(见图5),地层厚度最大的区域主要分布在磨溪22井区和磨溪102井区(图6),这些井区岩心录井上多显示为灰色白云岩,表明水体比较稳定;台缘带上的磨溪47井区残余地层厚度最薄,该井区岩心录井上表现为灰色与红褐色白云岩间互的特征,推测处于台缘内高点,沉积时期水体频繁动荡,并在灯影组末期整体抬升时剥蚀量最大;磨溪103井在岩心录井上也有类似特征。在东部台内带,残余地层厚度分布在240~300m之间,影响地层厚度变化的主要因素是桐湾运动末期的抬升剥蚀作用。磨溪17井区—磨溪8井区残余地层厚度最薄,推测为古岩溶高点,后期剥蚀量最大,磨溪12井区—磨溪13井区残余地层厚度较大,推测为古岩溶低点。

研究区在寒武纪早期为深水陆棚相,在灯影组

古地貌的背景上发育了巨厚的碎屑岩,至沧浪铺组沉积末期完成了“填平补齐”过程。在未经大规模构造运动的条件下,印模厚度指示的是区内寒武系沉积前古地貌,即灯影组抬升剥蚀后的古地貌。依据镜像关系,印模厚度低值区应反映残留古地貌高点。

本文根据残余厚度法确定台缘带和台内带范围(图8),利用印模厚度法进一步刻画不同相带的岩溶地貌单元。在东部台内带,印模厚度相对高值区分布在磨溪12井区、磨溪13井区(图7),反映这些区域为残留古地貌低点,这与残余厚度法恢复的古地貌特征相同(图6)。但是,在磨溪17井区—磨溪8井区,印模厚度存在差异(图7),反映残留古地貌高低起伏,比残余厚度法恢复结果能突出更多细节。

在西部台缘带,存在磨溪105井区—磨溪103井区和磨溪9井区这两个印模厚度低值区(图7),代表残留地貌高点,这些井区也表现出残余厚度较低的特征(图6);磨溪47井区为残余厚度低值区(图6)和印模厚度相对高值区(图7),表现为残留地貌低点,这可能为灯影组末期遭受更大剥蚀所致。

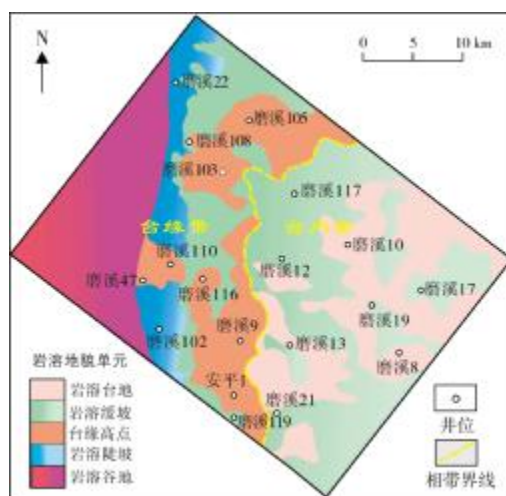


图8 川中磨溪地区灯四段顶部岩溶地貌划分

前人研究表明,灯四段下亚段沉积时,磨溪地区发育潟湖相,而东南方向的高石梯地区发育丘滩相,在地震剖面上形成一系列海退进积反射结构<sup>[20]</sup>,表明高石梯—磨溪地区整体古地貌呈东南高、西北低的特征。在这种大背景下,结合研究区实际资料,笔者认为灯四段的古岩溶地貌特征是由东南向西北倾伏,局部存在岩溶高点(图8)。综合残余厚度法和印模厚度法恢复的古地貌结果,按台内带和台缘带精



细刻画了灯四段顶部岩溶古地貌:根据实际地质条件把岩溶斜坡细分为岩溶缓坡、台缘高点、岩溶陡坡,这样全区共划分出岩溶台地、岩溶缓坡、台缘高点、岩溶陡坡和岩溶谷地等5种地貌单元(图8)。东部台内带的高点为岩溶台地,主要分布在磨溪10井区—磨溪8井区和磨溪13井区;本次研究将分隔岩溶台地的岩溶洼地统归到岩溶缓坡。往西北方向台缘带地势降低,根据坡度的大小,可划分为岩溶缓坡和岩溶陡坡,其中岩溶缓坡和陡坡的界线在磨溪22井—磨溪110井—磨溪102井一线;台缘带上的古地形高称为台缘高点,集中在磨溪47井区、磨溪103井区—磨溪105井区及磨溪110井区—磨溪9井区附近,这些台缘高点在沉积过程中起到障壁作用,利于形成灯四段局限的沉积环境。岩溶谷地分布在西侧的裂隙内,由于裂隙内灯四段地层剥蚀殆尽,一般又称为侵蚀谷地。

#### 4 古岩溶地貌对储层发育的影响

受海平面下降影响,磨溪地区于灯四段发育藻白云岩和颗粒白云岩。灯四段沉积末期,桐湾运动Ⅱ幕使磨溪地区整体抬升暴露接受改造,此时灯四段处于早成岩阶段,岩溶作用的物质基础是灯四段上亚段白云岩,岩溶作用主要体现在对早期孔渗层的溶蚀、扩大,以及沿断裂裂缝的溶蚀形成溶缝,从而形成横向上准层状储层与纵向上断裂裂缝、溶缝沟通的立体储渗空间。不同古岩溶地貌的古水文条件差异很大,并影响各个地貌单元的岩溶强度,进而导致储层发育的差异<sup>[12-16]</sup>。在古地貌的控制下,储层的类型和质量均有明显不同。根据岩心和成像测井资料,结合灯四段顶界的相干切片,探讨了研究区古地貌对储层的控制作用。

从灯影组顶界地震相干切片来看(图9),研究区总体上发育四组NW—SE向断层,磨溪110井区—磨溪117井区还存在与之交切的SW—NE向断层,西部断裂明显较东部发育。研究区西部地层连续性破坏程度高,平面上见蠕虫状暗黑色条纹纵横交错,在磨溪22井—磨溪102井一线尤其明显(图9),局部地区还可见一系列孔状结构;东部则整体呈浅灰白色的特征,仅在断层附近和局部地区能见明显的暗色条纹。

通过将单井产量、岩溶古地貌和相干切片叠合分析(图10),发现古地貌单元、沉积相带和断裂系统共同控制了储层的发育和分布。

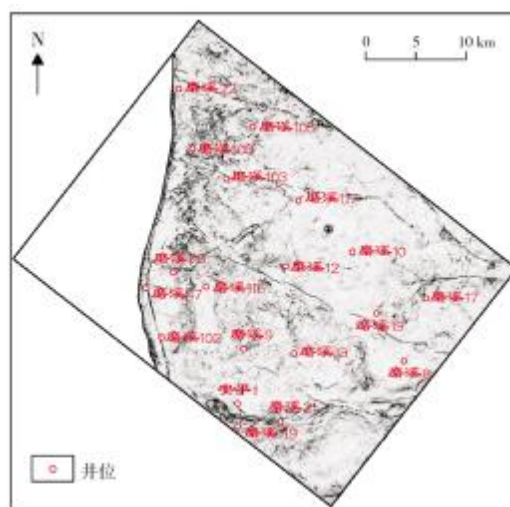


图9 川中磨溪地区灯影组顶界地震相干切片

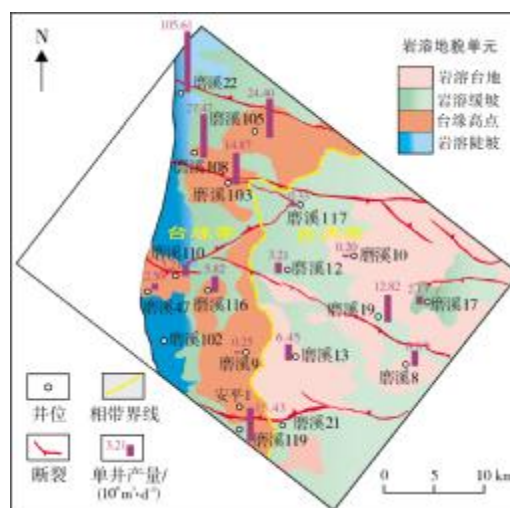


图10 川中磨溪地区灯四段储层综合评价

由图10可见,总体上区内岩溶台地上的平均单井产量明显低于岩溶斜坡的(包括岩溶缓坡、岩溶陡坡和台缘高点),岩溶储层在斜坡更加发育。成因机制上,一方面岩溶台地分布在东部的台内带,以台内潮坪相沉积为主,颗粒碳酸盐岩不甚发育;另一方面岩溶台地上岩溶作用强度低,岩溶台地水流以水平运动和侧向侵蚀为主,流速较慢,流势较弱。岩溶台地上的钻井岩心常见较致密的白云岩,储层以针孔为主(图11a),偶见孔径大于4mm的溶蚀孔洞(图11b),但规模较小,垂向厚度不超过3m;成像测井图上显薄层状,见孤立的暗色小斑点和条纹(图12a);相干切片上多表现为浅灰白色的特征(图9)。

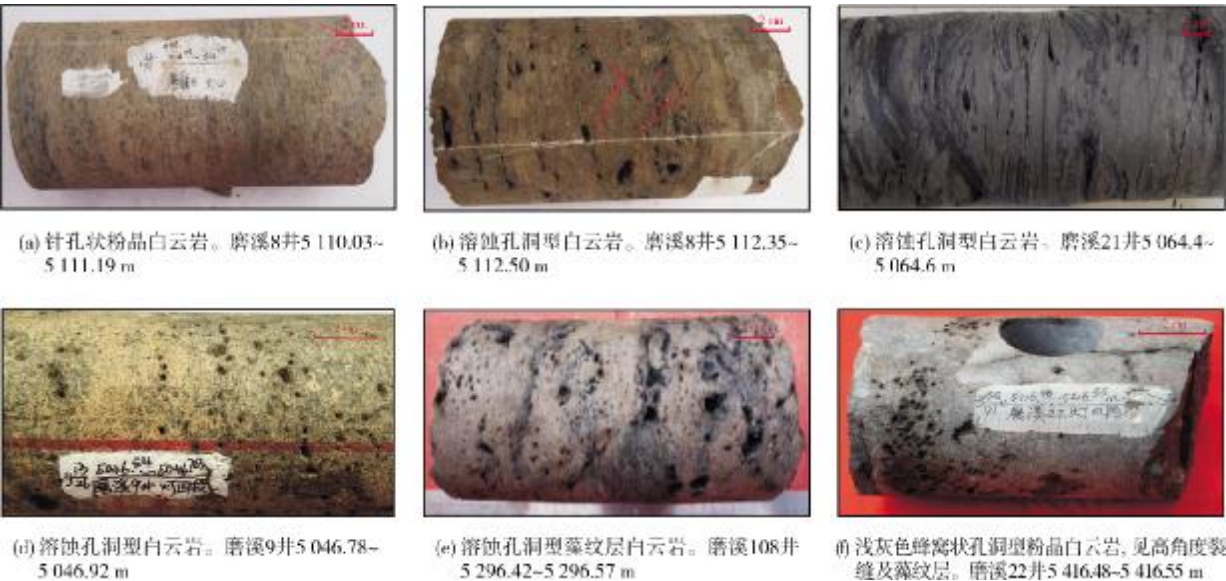


图11 川中磨溪地区灯四段上亚段典型储层岩心照片

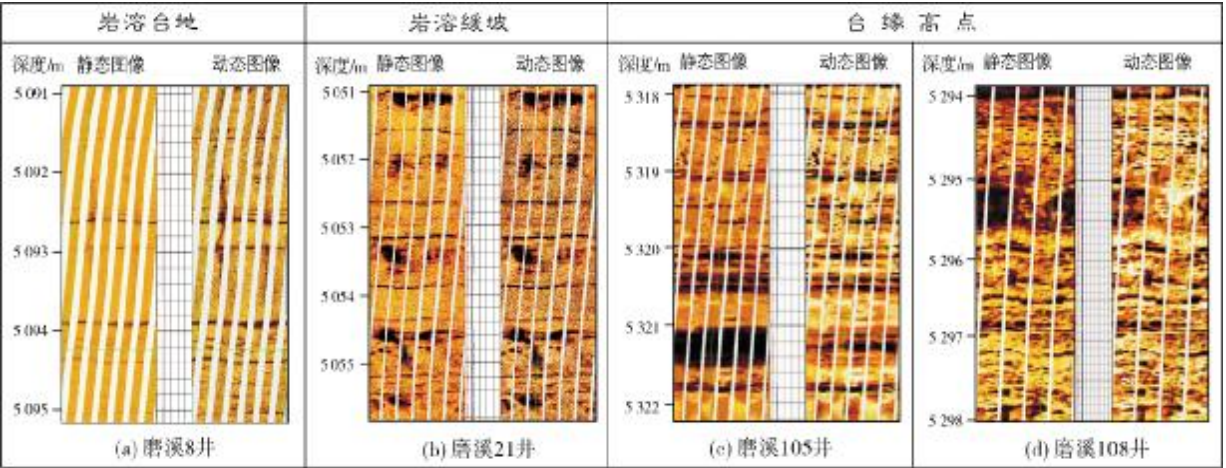


图12 川中磨溪地区不同岩溶地貌单元成像测井

在岩溶斜坡区域,岩溶水的水头差较大,流速较快,流势较强,以下蚀作用和侵蚀作用为主,溶蚀作用较强,常形成小型溶沟、溶洞。例如,东侧台地缓坡内的磨溪21井区,岩心中见较大的溶蚀孔洞(图11c),经测试平均孔隙度可达3%,间接证明了其储层质量好于岩溶台地系统;岩心观察也发现,西侧台缘斜坡普遍发育蜂窝状溶蚀孔洞型储层。

具体到台缘带,由图10可见,南部和北部的单井产量也有巨大的差异,这与岩溶作用强度有明显的分异相关。岩心及成像测井资料显示,南部磨溪116井区—磨溪9井区的岩溶强度远弱于北部断裂系统更加发育的磨溪103井区—磨溪22井区。台缘带南侧

的单井岩心中常见小型溶蚀孔洞(图11d),但分布较为零散,高角度裂缝不常见,单个溶蚀孔洞孔径不超过4 mm;成像测井表现为厚层一块状(图12b),暗色斑点和小斑块杂乱分布的特征,但斑块数量较少,且分布稀疏,局部见深色条带;相干切片则表现为整体呈浅灰色,灰黑色暗纹稀疏、杂乱分布的特征(图9)。台缘带北侧的钻井岩心中,常发育顺层溶蚀孔洞和高角度裂缝(图11e, 11f),孔径大于4 mm;成像测井上较大型的不规则暗色斑块杂乱密集分布,且暗色条带更加发育(图12c, 12d);相干切片上见蠕虫状的灰黑色暗纹纵横交错(图9),总体呈灰黑色,指示该区域裂缝发育程度更高,岩溶作用更强。



## 5 有利岩溶储层发育区优选

基于上述分析,对磨溪地区灯四段进行了有利岩溶储层发育区优选(图13)。I区为最有利发育区,研究区台缘带西北部和最南端的岩溶斜坡区,地貌高差较大,断裂系统发育,岩溶作用最强,储层质量最好。从后期新钻井(磨溪119井)来看,岩心见蜂窝状溶蚀孔洞,测试产量达 $15.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,这证明了该区的勘探潜力。II区为次一级发育区,位于研究区东侧断裂系统较发育的岩溶缓坡和西侧台缘带的中部地区,该类区带一般受沉积相带、古地貌及断裂发育程度的影响,岩溶作用有所减弱。其余划为III区,岩溶储层发育程度一般。

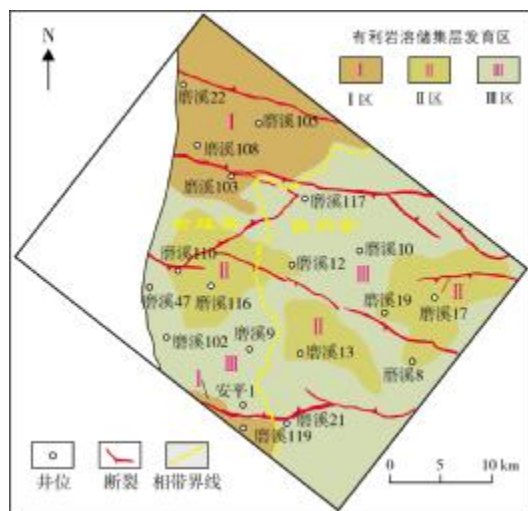


图 13 川中磨溪地区岩溶储层有利分布区

灯四段沉积末期,研究区西侧形成侵蚀谷地的地貌特征,在这种地貌背景下,寒武纪早期经历快速海侵,在裂隙内沉积了巨厚的黑色泥页岩<sup>[26]</sup>,形成了研究区最主要的烃源中心,生气强度可达到 $140 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^3$ <sup>[27-28]</sup>。裂隙内发育的优质烃源岩,可与台缘带的岩溶斜坡发育的优质储层大面积侧向对接,生烃期油气侧向近距离运移到灯四段储层,有利于油气的近源成藏。靠近生烃中心的台缘滩相,是油气富集成藏的最有利区。

## 6 结论

(1)四川盆地磨溪地区震旦系灯影组四段发育古岩溶储层。基于磨溪地区三维地震和钻井、测井

资料,综合分析残余厚度法和印模法恢复的古地貌结果,按台内带和台缘带精细刻画了灯四段的岩溶古地貌:由东南向西北倾伏,局部存在岩溶高点;根据实际地质条件把岩溶斜坡细分为岩溶缓坡、台缘高点、岩溶陡坡,全区共划分出岩溶台地、岩溶缓坡、台缘高点、岩溶陡坡和岩溶谷地等5种地貌单元。

(2)古地貌单元、沉积相带和断裂系统共同控制了储层的发育和分布。西侧台缘带断裂系统发育的岩溶斜坡是岩溶储层最为有利的发育区。

(3)岩溶谷地发育的烃源岩与台缘带岩溶斜坡发育的优质储层侧向对接,易于形成近源油气藏。断裂系统发育的台缘滩相带可作为下一步的勘探目标。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 汪泽成,姜华,王铜山,等.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,2014,41(3): 305-312.
- [3] 江青春,胡素云,王泽成,等.四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J].石油学报,2012,33(6): 950-960.
- [4] CALNER M, LEHNERT O, NÖLVAK J. Paleokarst evidence for widespread regression and subaerial exposure in the middle Katian (Upper Ordovician) of Baltoscandia: significance for global climate[J]. Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology, 2010, 296: 235-247.
- [5] 拜文华,吕锡敏,李小军,等.古岩溶盆地岩溶作用模式及古地貌精细刻画[J].现代地质,2002,16(3): 23-26.
- [6] 何自新,黄道军,郑聪斌,等.鄂尔多斯盆地奥陶系古地貌、古沟槽模式的修正及其地质意义[J].海相油气地质,2006,11(2): 25-28.
- [7] 杨华,黄道军,郑聪斌.鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌特征及勘探进展[J].中国石油勘探,2006,11(3): 1-6.
- [8] 张庆玉,陈利新,梁彬,等.轮古西地区前石炭纪古岩溶微地貌特征及刻画[J].海相油气地质,2012,17(4): 23-26.
- [9] 张庆玉,梁彬,秦凤蕊,等.塔里木盆地奥陶系古潜山碳酸盐岩岩溶储层评价与预测:以轮古7井区以东为例[J].中国岩溶,2017,36(1): 32-41.
- [10] 刘伟方,郑多明,王洪求,等.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山古水系研究方法及其意义[J].海相油气地质,2013,18(4): 75-81.
- [11] 徐宝亮,臧殿光,李明杰,等.岩溶储层综合预测技术在四川盆地Y地区的应用[J].石油地球物理勘探,2016,51(增刊): 47-51.
- [12] 金民东,谭秀成,童明胜,等.四川盆地高石梯—磨溪地区灯四段岩溶古地貌恢复及地质意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1): 58-68.



- [13] 金民东, 谭秀成, 曾伟, 等. 四川盆地磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组构造古地貌恢复及地质意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 634-644.
- [14] 唐大海, 肖笛, 谭秀成, 等. 古岩溶地貌恢复及地质意义: 以川西北中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 689-695.
- [15] 刘宏, 罗思聪, 谭秀成, 等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 283-293.
- [16] 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1992-2002.
- [17] 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 179-188.
- [18] 魏国齐, 谢增业, 宋家荣, 等. 四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系天然气特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 702-711.
- [19] 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.
- [20] 文龙, 杨跃明, 游传强, 等. 川中—川西地区灯影组沉积层序特征及其对天然气成藏的控制作用[J]. 天然气工业, 2016, 36(7): 8-17.
- [21] 刘豪, 王英民. 塔里木盆地早古生代古地貌: 坡折带特征及对地层岩性圈闭的控制[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 298-304.
- [22] 喻林, 何燕, 陈红, 等. 基于古地貌恢复的湖相碳酸盐岩沉积模式研究[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(增刊): 126-130.
- [23] 何江, 沈昭国, 方少仙, 等. 鄂尔多斯盆地中部前石炭纪岩溶古地貌恢复[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 8-16.
- [24] 赵俊兴, 陈洪德, 向芳. 高分辨率层序地层学方法在沉积前古地貌恢复中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 76-81.
- [25] 李伟, 刘静江, 邓胜徽, 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[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 546-556, 563.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 257-265.

编辑:董庸

## The application of paleogeomorphology restoration to the study of karst weathering crust reservoir: a case from the fourth member of Dengying Formation in Moxi area, Sichuan Basin

ZHU Mao, SHEN Anjiang, ZENG Hongliu, LI Wenzheng, GU Mingfeng, TIAN Han

**Abstract:** Due to the Tongwan Movement, large-scale weathering crust karstification developed in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. Taking Moxi area as a case, the residual thickness method and the impression method are respectively used to restore the paleogeomorphology of the fourth member of Dengying Formation based on the 3D seismic data and drilling data. Comprehensive analysis shows that the paleogeomorphology in Moxi area is undulating from southeast to northwest with locally karst peak, and it can be subdivided into two parts such as internal zone and marginal zone according to the sedimentary facies. In general there are three geomorphology units, i.e., karst platform, karst slope, and karst valley, while in Moxi area the karst slope can be subdivided into gentle slope, steep slope, and marginal highland based on the restored maps, by which five units developed. The development of karst reservoirs are jointly controlled by sedimentary facies, paleokarst geomorphology, and fault systems. In the internal zone, the karst platform has the weakest dissolution, with storage space of mainly pinhole, and smaller dissolved pores and cavities, while the gentle slope has stronger dissolution, with reservoir space dominated by larger dissolved pores. In the marginal zone, the karst slope has the strongest dissolution, with storage space of mainly honeycomb dissolved pores and cavities, and the karst intensity is also controlled by the fractures. It is shown that the karst slope with fracture system developed in the platform margin is the most favorable zone of the best quality reservoirs, and the karst platform in the internal zone can also be the next favorable play, especially with low exploration degree.

**Key words:** Sinian; Dengying Formation; karst paleogeomorphology; karst reservoir; Moxi area; Sichuan Basin

**ZHU Mao:** MSc, Geology Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Road, Hangzhou, Zhejiang 310023, China