

# 四川盆地东部二叠系茅口组层序地层特征及地质意义

胡罗嘉<sup>1,2,3,4</sup>, 黄世伟<sup>5</sup>, 谭万仓<sup>6</sup>, 谭秀成<sup>1,2,3</sup>, 苏成鹏<sup>7</sup>,  
胡笙<sup>3</sup>, 李明隆<sup>1,2,3</sup>, 刘菲<sup>8</sup>, 冯亮<sup>8</sup>

1 油气藏地质及开发工程国家重点实验室; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室;  
3 西南石油大学地球科学与技术学院; 4 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院;  
5 大庆油田有限责任公司勘探事业部; 6 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院;  
7 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院; 8 中国石油西南油气田公司重庆气矿

**摘要** 充分利用40多口探井的岩心、录井和测井等资料,对川东二叠系茅口组进行层序地层划分,剖析层序界面特征,建立等时层序地层格架,在此基础上总结地层充填规律,探讨了层序格架中的沉积古地理格局和有利储集区带分布。识别了茅口组3个I型层序界面和3个II型层序界面,提出茅口组划分为5个三级层序的新方案。茅口组层序地层总体上具有下部超覆、顶部削蚀的特征,下部的SQ<sub>1</sub>层序由东北往西南向海西期古隆起和古地貌高地超覆,顶部的SQ<sub>5</sub>层序因东吴运动有不同程度缺失。层序格架内地层总体上表现出东西分异、厚薄相间的分布趋势:SQ<sub>3</sub>、SQ<sub>4</sub>层序在研究区中部均发育一个成带状展布的地层增厚带,可能对应于弱镶边的台缘滩相带,该带以东为地层减薄区,与发育孤峰段泥页岩、硅质页岩的深水沉积区相吻合,展现出从西往东水体逐渐变深、由碳酸盐台地到陆棚的古地理格局。指出层序地层格架内有利储集相带与I型层序界面下早成岩期岩溶改造的叠合,有利于茅口组形成富有特色的岩溶型石灰岩储层。

**关键词** 层序地层; 地层充填; 岩相古地理; 颗粒滩; 岩溶; 茅口组; 四川盆地东部

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

## 0 前言

近期,四川盆地东部地区(简称“川东”)的WT1井、QL50井和W67井均在中二叠统茅口组试获高产工业气流,展示了该区茅口组良好的勘探前景<sup>[1]</sup>。层序地层学研究一直是茅口组沉积储层研究的重点之一<sup>[2-3]</sup>,通过对沉积地层进行精确划分、对比和分析,为沉积相带划分、岩相古地理重建、岩溶地貌恢复和储层预测等提供了良好的理论和实测方法。前人从不同角度开展了茅口组层序研究工作<sup>[4-14]</sup>,由于这些研究大多以整个盆地对象,同时川东茅口组后期受剥蚀较为严重,层序界面可对比性较差,研究范围、研究程度的差异使得茅口组层序地层划分方案存在争议,集中体

现在三级层序数量、每一个三级层序对应的岩性地层段等方面。

作者基于川东茅口组钻井岩心、测录井和成像测井、薄片观察等资料,在层序界面特征研究的基础上,通过地层精细划分对比,将茅口组共划分为5个三级层序,进一步明确等时地层格架内地层充填规律,探讨了古地理演化。该项研究可为川东茅口组油气勘探提供基础依据。

## 1 区域地质概况

研究区位于四川盆地东部,构造位置大部分处于川东高陡褶皱带,局部处于川北低陡褶皱带、川中低缓褶皱带、川南低陡褶皱带(图1a)。泥盆纪末期的柳江运动以及石炭纪的云南运动,使盆地沉积

收稿日期:2020-12-27; 改回日期:2021-03-08; 网络出版日期:2021-07-02

本文受中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目“深层碳酸盐岩成烃-成储-成藏理论技术及目标区带优选技术研究(编号:2020CX010300)资助

**第一作者**: 胡罗嘉, 硕士, 主要从事储层地质学方面的研究。通信地址: 610041 四川省成都市武侯区天府大道北段12号西南油气田科技大厦; E-mail: 260384105@qq.com

**通信作者**: 谭秀成, 教授, 博士生导师, 主要从事碳酸盐岩沉积学与储层地质学研究。通信地址: 610500 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学地球科学与技术学院; E-mail: tanxiucheng70@163.com

基底暴露剥蚀,导致研究区普遍缺失下二叠统<sup>[15-18]</sup>。在广泛海侵背景下形成的中二叠统,分别超覆于石炭系、泥盆系、志留系或更老地层之上<sup>[14,19]</sup>,自下而上分为梁山组、栖霞组和茅口组(图1b)。中二叠世早期研究区发生由东向西的广泛海侵,形成梁山组碎屑滨岸相沉积<sup>[20]</sup>,到栖霞期过渡为碳酸盐台地沉积,栖霞末期海平面下降,沉积区转化为暴露区受到大气水淋滤溶蚀,形成一个区域性暴露侵蚀不整合面<sup>[16]</sup>。茅口早期再次广泛海侵,茅口组下部茅一段发育一套典型泥灰岩-灰岩(也称之为眼球眼皮状灰岩)韵律互层沉积<sup>[21]</sup>,向中上部过渡为灰色、深灰色含生物碎屑灰岩、泥晶生物碎屑灰岩,夹有泥

质灰岩和含泥灰岩,含较多的燧石结核或条带,局部发育白云岩。某些地区茅二段中上部至茅四段发育一套名曰“孤峰段”的硅质泥页岩,它与茅口组碳酸盐岩属于同期异相(图1b)<sup>[22-23]</sup>。受东吴运动引发的构造抬升作用影响,茅口组中晚期盆地发生沉积分异,呈现隆凹相间的沉积格局。茅口组顶部遭到不同程度剥蚀,形成区域性暴露不整合面<sup>[24-26]</sup>。该剥蚀面与孤峰段的欠补偿沉积共同控制了茅口末期的地貌特征。茅口组之上覆盖了上二叠统龙潭组滨岸—潮坪沉积,岩性以泥页岩为主。平面上研究区茅口组为一套连续沉积,沉积分异不大,具备等时、可对比的条件。

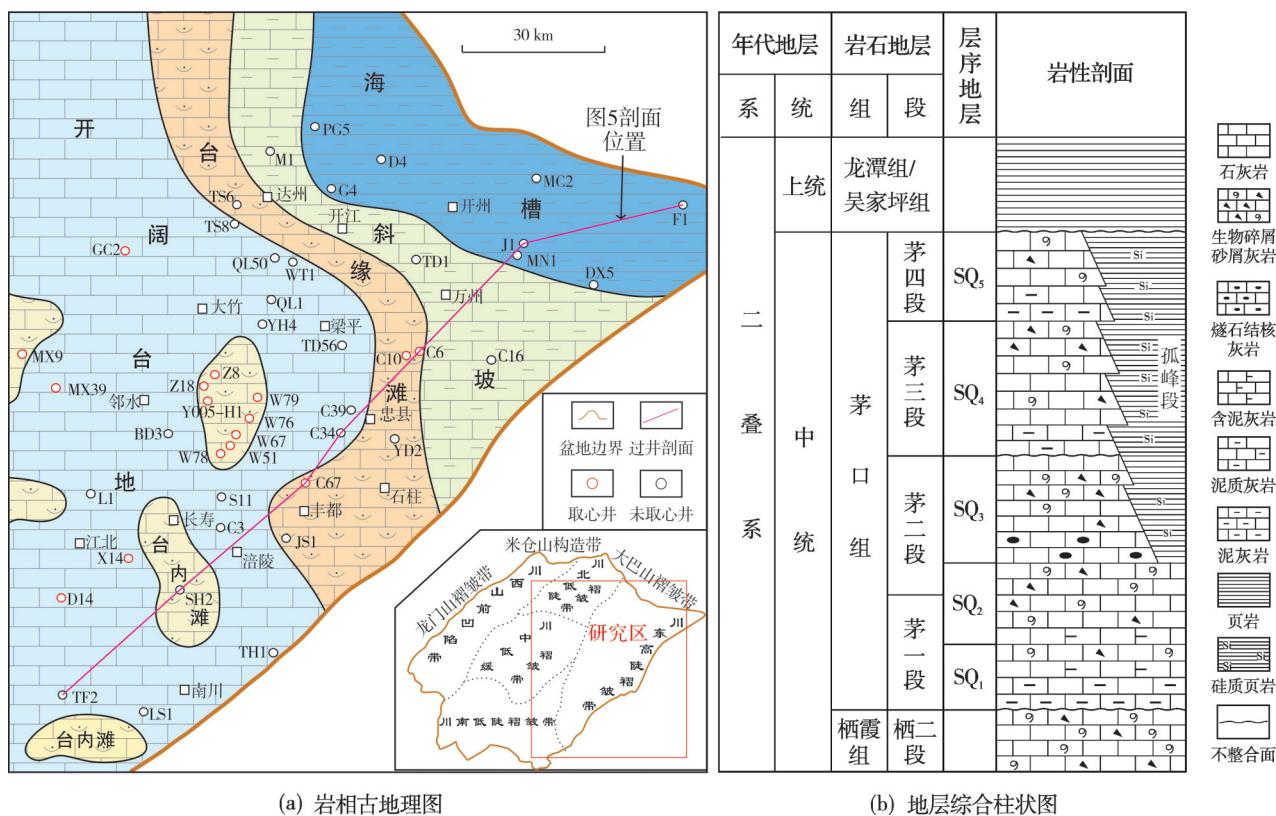


图1 川东二叠纪岩相古地理及茅口组地层综合柱状图

Fig. 1 Lithofacies palaeogeography of Permian and comprehensive stratigraphic column of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

## 2 层序地层格架建立

以经典的层序地层学理论与方法为指导<sup>[27-28]</sup>,在钻井岩心精细描述、取样及薄片鉴定的基础上,结合自然伽马曲线的旋回变化特征,对研究区40多口探井的二叠系茅口组进行层序地层划分、对比和追踪。研究区茅口组的碳酸盐岩依据颗粒含量由

高到低可划分为4种结构类型:颗粒岩类、泥粒岩类、粒泥岩类和泥晶岩类,其中颗粒岩类包括亮晶生物碎屑(砂屑)灰岩、泥-亮晶生物碎屑(砂屑)灰岩等,泥粒岩类包括泥晶生物碎屑(砂屑)灰岩等,粒泥岩类包括含生物碎屑泥晶灰岩、砂屑泥晶灰岩等,泥晶岩类包括泥晶灰岩、含泥灰岩、泥质灰岩、泥灰岩等(图2)。

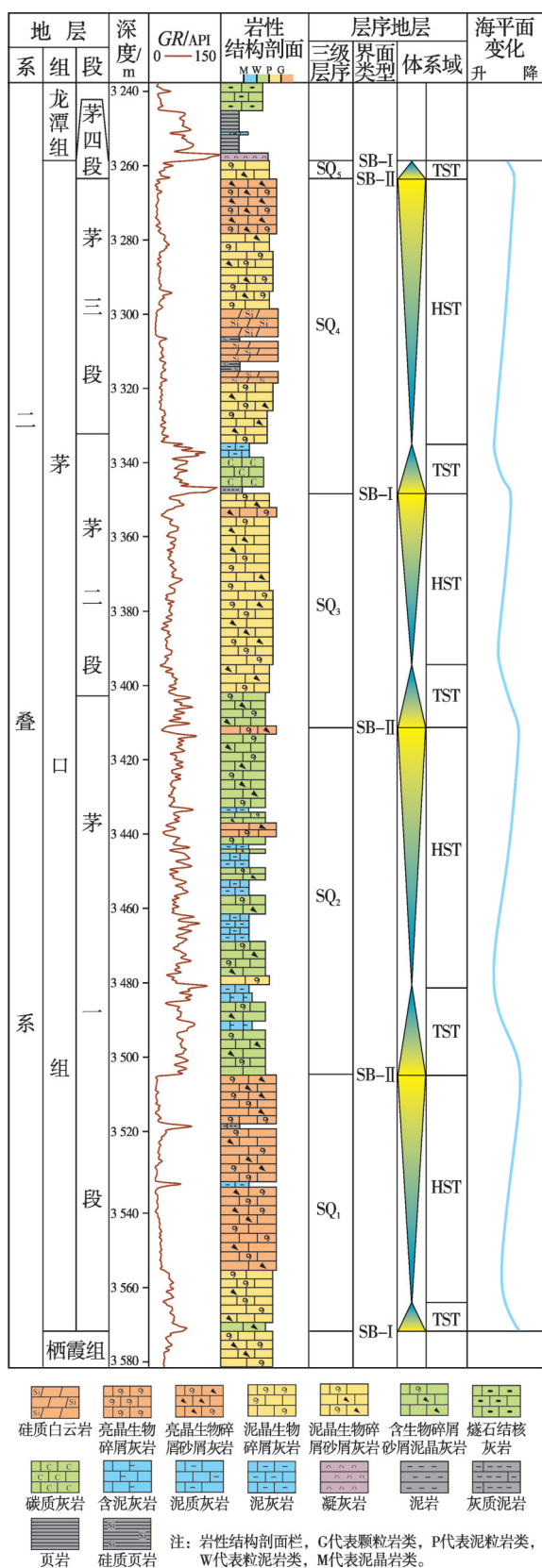


Fig. 2 Comprehensive sequence stratigraphic column of Maokou Formation of Well C67 in eastern Sichuan Basin

## 2.1 层序地层方案

在川东茅口组中识别出两种类型的层序界面, SB-I 和 SB-II, 前者为暴露不整合面(I型), 后者为岩性-岩相转换面(II型); 从下到上划分为5个三级层序(SQ<sub>1</sub>至SQ<sub>5</sub>), 除上部的SQ<sub>5</sub>因后期缺失而仅残存TST外, 其余各层序均由TST和HST组成(图2)。层序界面之下GR曲线多表现为相对低值, 对应沉积以颗粒岩类为主; 界面之上GR曲线表现为相对高值, 对应沉积以泥粒岩类、粒泥岩类为主, 泥质含量增高。如图2所示, 该方案与岩石地层大致对应关系为: SQ<sub>1</sub>对应茅一段中下部, SQ<sub>2</sub>对应茅一段上部, SQ<sub>3</sub>对应茅一段顶部至茅二段, SQ<sub>4</sub>对应茅二段顶部及茅三段, SQ<sub>5</sub>对应茅四段。

## 2.2 I 型层序界面特征

海相碳酸盐岩层系的 I 型层序界面,是当海平面迅速下降且速率大于碳酸盐台地或滩边缘盆地沉降速率,海平面位置低于台地或滩边缘时所形成的。以侵蚀不整合面标志为依据,在茅口组顶、底及内部共识别出以下 3 个 I 型层序界面(图 2)。

茅口组与下伏栖霞组分界面 为一典型侵蚀不整合面<sup>[29-30]</sup>。研究区 Z8 井揭示, 栖霞组岩性主要为浅色生物碎屑灰岩、泥晶生物碎屑灰岩, 茅口组 SQ<sub>1</sub> 岩性为眼球眼皮状灰岩、泥晶生物碎屑灰岩、泥质灰岩等(图 3a)。茅一段下部有机质含量增高, GR 曲线由栖霞组顶部的锯齿状低—中值向上转变为茅口组底部的指状中—高值(图 3a)。MX9 井成像测井显示, 栖霞组顶部表现为亮色中—厚层夹暗色薄层条纹, 向界面之上茅口组 SQ<sub>1</sub> 过渡为亮色中—薄层条带夹暗色薄层条纹(图 4a)。

茅口组内部  $SQ_3$  与  $SQ_4$  分界面 基于全盆地有关地质资料,川东茅口组内幕  $SQ_3$  与  $SQ_4$  之间同样存在暴露不整合面。从 W79 井揭示的岩性看,  $SQ_3$  主要为泥粒岩类和颗粒岩类(图 3b),镜下可见微裂缝和溶洞发育,充填黑色碳质和方解石晶粒;  $SQ_4$  岩性为泥页岩、灰质泥岩。GR 曲线由锯齿状低值向上突变为指状、锯齿状高值(图 3b)。MX9 井成像测井显示,  $SQ_3$  顶部亮色中厚层(灰岩)向上突变为  $SQ_4$  底部亮色薄层(灰岩),且在界面之下可见少量暗色溶洞(图 4b),这表明  $SQ_3$  顶部曾经由于暴露而遭受大气淡水的溶蚀改造。

茅口组与上覆龙潭组分界面 中二叠世末—



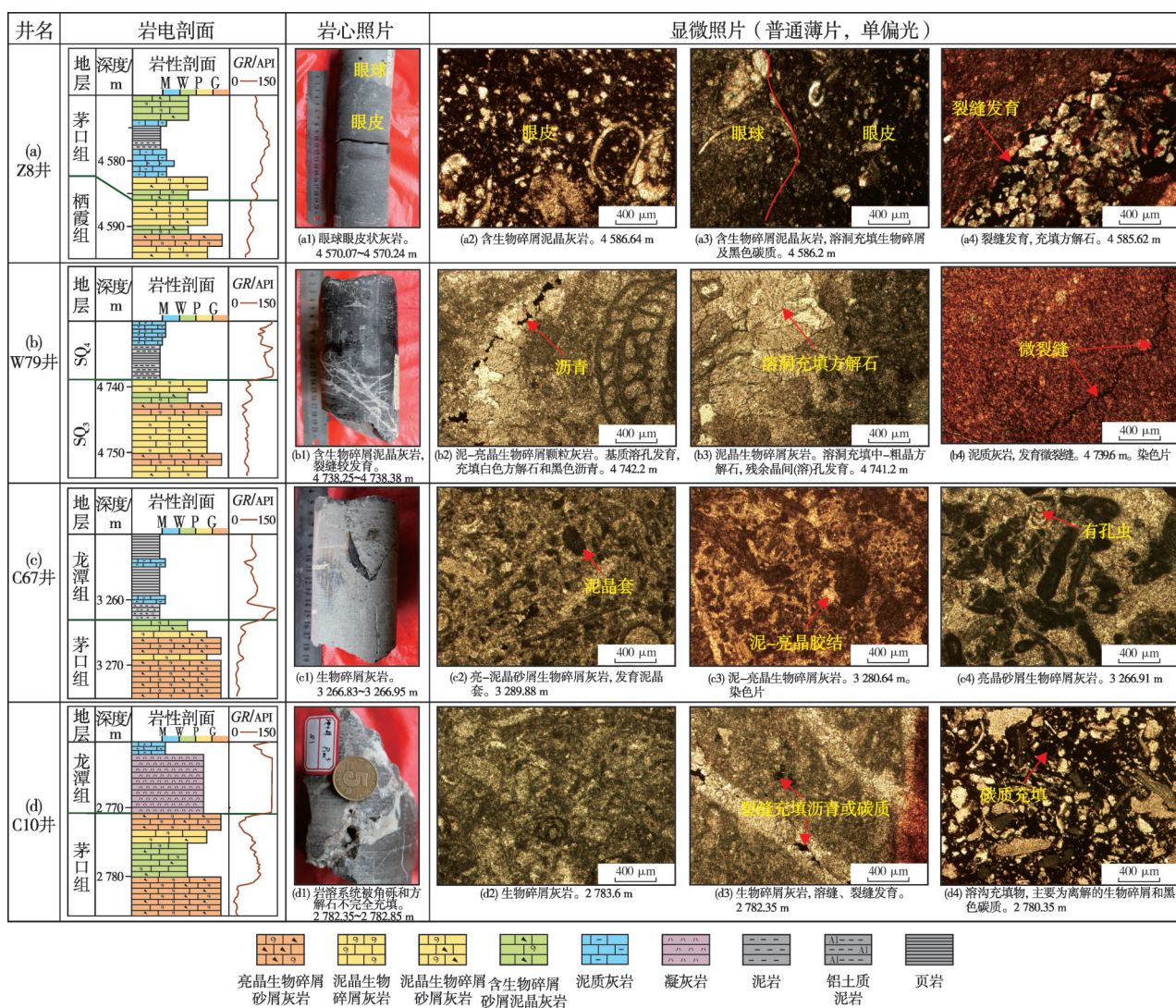


图3 川东茅口组 I 型层序界面上下岩性及自然伽马特征

Fig. 3 Lithology and natural gamma characteristics of the upper and lower strata of SB- I of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

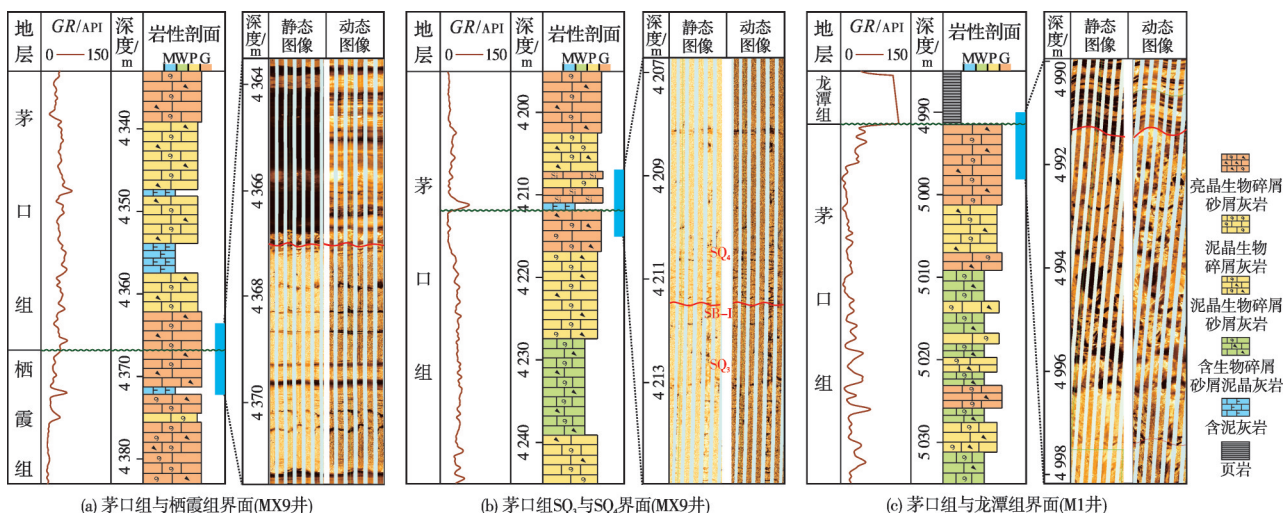


图4 川东茅口组 I 型层序界面上下成像测井响应特征

Fig. 4 FMI image characteristics of the upper and lower strata of SB- I of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin



晚二叠世初发生的东吴运动,导致茅口组抬升出露地表,形成一个区域性不整合面<sup>[8-9,31]</sup>。研究区C67井揭示,茅口组顶部主要发育亮晶生物碎屑灰岩、泥晶生物碎屑灰岩,上覆龙潭组主要为泥页岩(图3c)和煤系地层,局部地区还发育火山岩,岩性有玄武岩、凝灰岩(图3d)、凝灰质砂岩等。GR曲线由颗粒灰岩的箱状、锯齿状低—中值向上突变为锯齿状中—高值(图3c,3d)。M1井成像测井中,茅口组顶部可见大量岩溶作用形成的暗色溶洞,上覆龙潭组呈现泥灰岩、泥岩互层的亮—暗色薄互层(图4c)。

### 2.3 II型层序界面特征

海相碳酸盐岩层系的II型层序界面,是在海平面下降速率小于盆地沉降速率时形成的。主要以岩性-岩相转换面作为判识标志,在茅口组内自下而上共识别出3个II型层序界面(图2)。

总体上,II型层序界面之下多为颗粒含量较高的砂屑、生物碎屑灰岩,如SQ<sub>1</sub>顶部发育的泥晶-亮晶生物碎屑灰岩、亮晶-泥晶生物碎屑灰岩以及SQ<sub>4</sub>

顶部的亮晶生物碎屑砂屑灰岩(图2)。界面之上的灰岩,颗粒含量明显减少,灰泥含量逐渐增多,结构类型主要为粒泥岩类,岩石类型主要有SQ<sub>2</sub>底部、SQ<sub>3</sub>底部的生物碎屑泥晶灰岩以及SQ<sub>5</sub>底部(茅四段底部)的砂屑泥晶灰岩、含生物碎屑泥晶灰岩、泥晶灰岩等(图2)。这表明转换面之下以发育向上变粗的沉积序列为特征,而转换面之上为向上变细的沉积序列,预示着又一海侵旋回的开始。

## 3 层序地层充填规律

在单井层序地层划分和层序界面识别的基础上,应用碳酸盐岩层序地层学理论和方法,在研究区建立茅口组层序地层格架。

### 3.1 层序格架与充填过程

以茅口组SQ<sub>2</sub>最大海泛面(MFS)作为等时界面进行层拉平和层序地层对比基准面,选取北东向的一条典型剖面进行层序地层横向对比,以展示茅口组层序格架内的沉积充填特征(图5)。

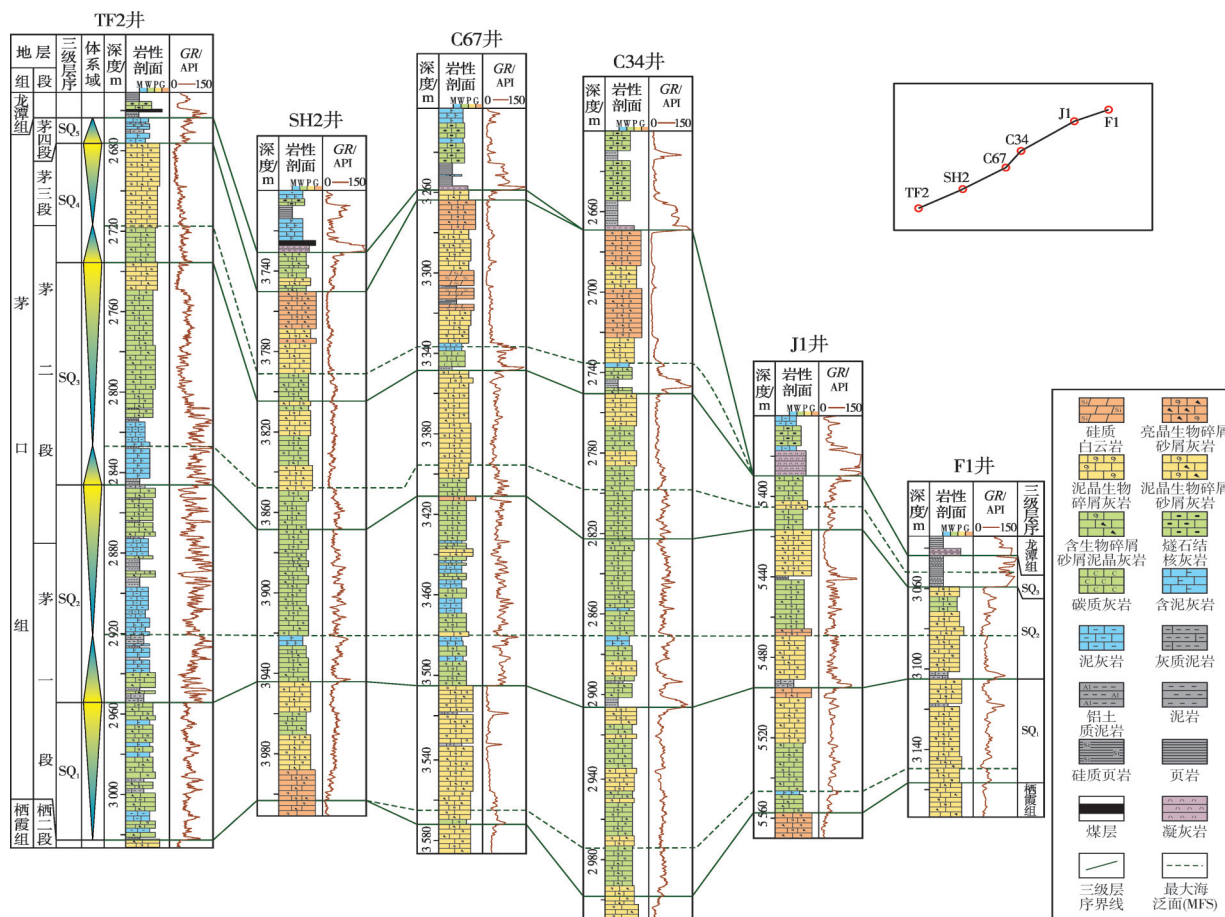


图5 川东茅口组层序地层对比剖面图(剖面位置见图1)

Fig. 5 Sequence stratigraphic correlation section of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin (section position is shown in Fig.1)

如图5所示,由东北至西南方向, $SQ_1$ 地层厚度总体上呈现出逐渐减薄的变化趋势,具有超覆沉积的特征。尤其是下部的TST表现更为明显,地层不仅逐渐减薄,并且在西部的TF2井、SH2井等井区完全缺失(反映该区在 $SQ_1$ 海侵期未接受沉积)。由于研究区 $SQ_1$ 广泛发育浅水眼球眼皮状灰岩<sup>[21]</sup>,黏土含量低,有机质含量高,导致部分井 $SQ_1$ 的TST下部GR值总体低于HST。

$SQ_2$ 地层遍布全区,在对比剖面中可追踪对比;其中的TST沉积为茅口期最大海泛沉积,全区稳定分布,易追踪对比,可作为区域对比的标志层。 $SQ_2$ 地层厚度出现了一定的分异,主要表现为持续沉降区和颗粒滩发育区地层厚度较大,而且HST地层厚度普遍大于TST地层厚度。

$SQ_3$ 地层在北东—南西方向上发育相对完整,但横向变化较大。由C67井区到J1井区,再到F1井区 $SQ_3$ ,地层厚度急剧减小,岩性特征也发生了明显变化,由C67井区的泥晶颗粒灰岩变化为F1井区的泥岩、页岩。岩性和厚度的空间变化,是对沉

积环境分异(从中西部的浅水碳酸盐台地到东部的欠补偿的深水环境)的响应。

$SQ_4$ 地层继承性地呈现出西南厚东北薄的变化趋势,并且HST地层厚度普遍大于TST地层厚度。然而,由于受后期东吴运动引发的构造抬升和差异剥蚀的影响,该层序地层保存不全,C34井区以东,J1井、F1井区 $SQ_4$ 地层完全缺失。

$SQ_5$ 地层在研究区东北部完全缺失,仅在西南部残存少量TST地层,厚度一般小于30 m,如TF2井、SH2井、C67井等井区。

综上所述,研究区茅口组层序地层总体上具有下部超覆、顶部削蚀的特征:下部的 $SQ_1$ 层序由东北往西南向海西期古隆起和古地貌高地逐渐超覆、减薄;顶部普遍存在明显的地层减薄缺失现象,而且在东北部更为明显。

### 3.2 层序地层分布规律

根据研究区内40多口探井的茅口组5个三级层序的分层与厚度数据,分别编绘 $SQ_1$ 至 $SQ_5$ 层序地层厚度分布图(图6),展示地层充填特征及演化。

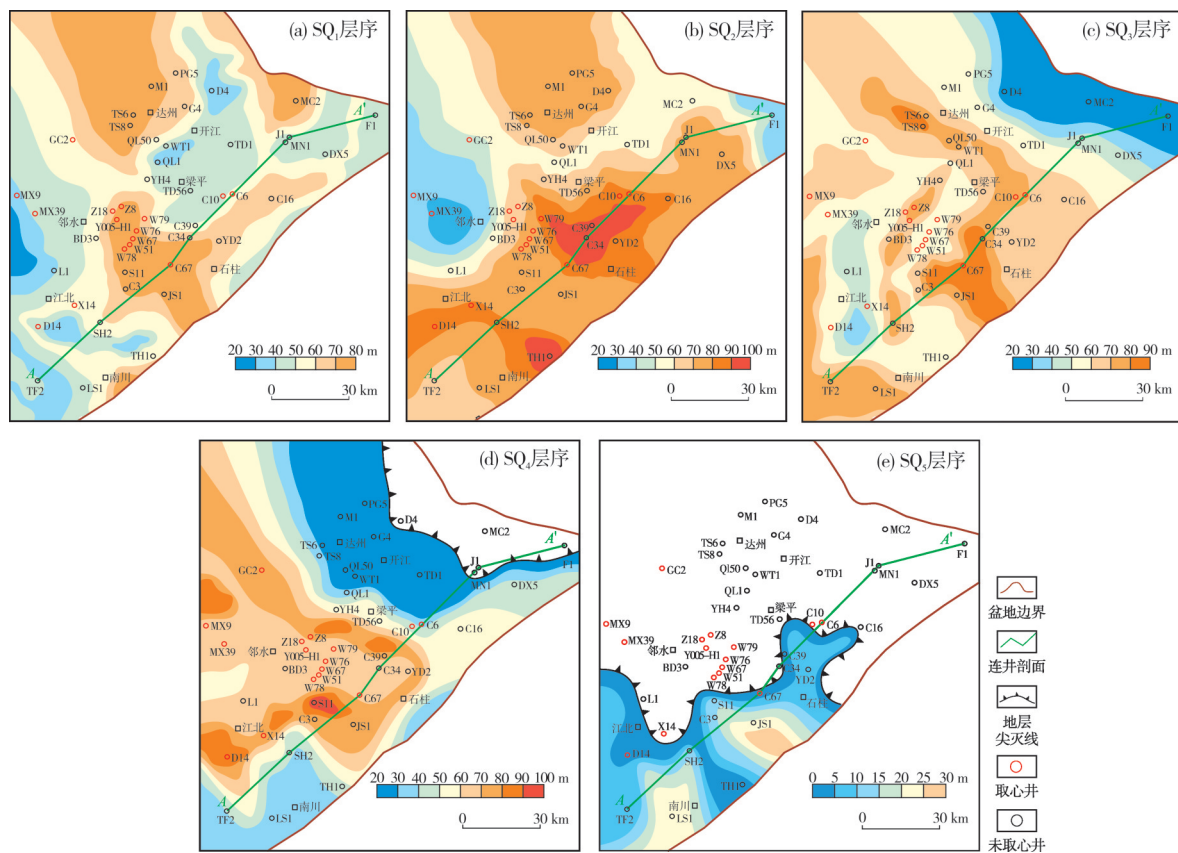


图6 川东茅口组各层序厚度等值线图

Fig. 6 Thickness contour map of each sequence of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin



SQ<sub>1</sub>层序地层厚度分布在20~80 m之间,总体上表现出东西分异、厚薄相间的分布趋势(图6a):在研究区中部,大致在TS6井—TS8井—W78井—C67井区一带,厚度较大,一般大于60 m;该带以西,地层厚度逐渐减薄,在MX9井—MX39井区一带,厚度普遍小于50 m;该带以东,在J1井—DX5井—F1井区一带及其以东地区,厚度普遍小于60 m。

SQ<sub>2</sub>层序地层厚度平面分布具有一定继承性。SQ<sub>2</sub>层序总体上厚度较大,普遍超过50 m(图6b),尤其是在东南部的DX5井—石柱—南川一带,最大厚度可达90多米,例如C34井、TH1井等井区。然而,在西部的MX39井区和东部的F1井区附近,厚度较薄(小于40 m)。

SQ<sub>3</sub>层序地层厚度呈现出明显的东西分异和厚薄相间的分布格局(图6c):大致在中部的TS8井—C34井—C67井区一带,表现为一个向东凸出的弓形增厚带,厚度普遍大于70 m;该带以西,仍表现为厚薄相间的分布特征,厚度一般介于30~70 m;该带以东,向东北逐渐减薄,在研究区东北缘的D4井—MC2井—F1井一带,层序厚度最薄(小于30 m)。

SQ<sub>4</sub>层序地层厚度分布表现出对SQ<sub>3</sub>层序的继承与发展,东西分异明显(图6d):大致在TS8井—QL1井—C10井—石柱—SH2井—TF2井一线以西,厚度较大,普遍大于70 m,局部可达90多米(例如S11井区),这一厚度带总体上呈向东凸出的马蹄形展布;该线向东北迅速减薄到30 m以下,局部被剥蚀殆尽,向东向南减薄至40 m以下。

受后期东吴运动引发的差异升降和差异剥蚀的影响,SQ<sub>3</sub>层序地层残缺不全(图6e):研究区北部被剥蚀殆尽,仅在西南部的邻水—江北—南川—石柱一带残存了层序下部(以TST为主),厚度普遍小于20 m,局部在20~30 m之间,例如JS1井、LS1井两个井区。

## 4 地质意义

### 4.1 岩相古地理演化

二叠系沉积前,四川盆地古地貌总体表现为西南高、东北低的特征<sup>[12]</sup>。中二叠世,受峨眉地裂运动的影响,扬子板块处于拉张环境,海水主要从东、北、南等3个主要方向进入,四川盆地以发育栖霞组 and 茅口组为代表的海相碳酸盐沉积为特征。川东茅口组下部SQ<sub>1</sub>层序向海西期古隆起和古高地超覆(图5),整体上SQ<sub>1</sub>和SQ<sub>2</sub>沉积期为—具有微地貌起伏的开阔台地环境,以广泛发育台内滩和滩间海沉积为特征<sup>[21,32-33]</sup>。

在东吴运动的持续影响下,茅口组沉积环境由SQ<sub>1</sub>、SQ<sub>2</sub>的开阔台地逐渐演变为SQ<sub>3</sub>具缓斜坡的弱镶边碳酸盐台地沉积体系<sup>[12,17,30,34]</sup>。SQ<sub>3</sub>沉积期继承了前期西南高、东北低的古地貌,叠加北西向隆洼相间的古地理格局,控制了SQ<sub>3</sub>的沉积演化及平面分布,开始出现北东—南西向古地貌分异和沉积分异(图5);东部F1井区开始发育以泥页岩、硅质页岩等为代表的孤峰段深水沉积,在MC2井区具有同样的特点(图7a),表明研究区东缘开始加速沉降,水体变深;向西,大致在中部的TS6井—TS8井—C67

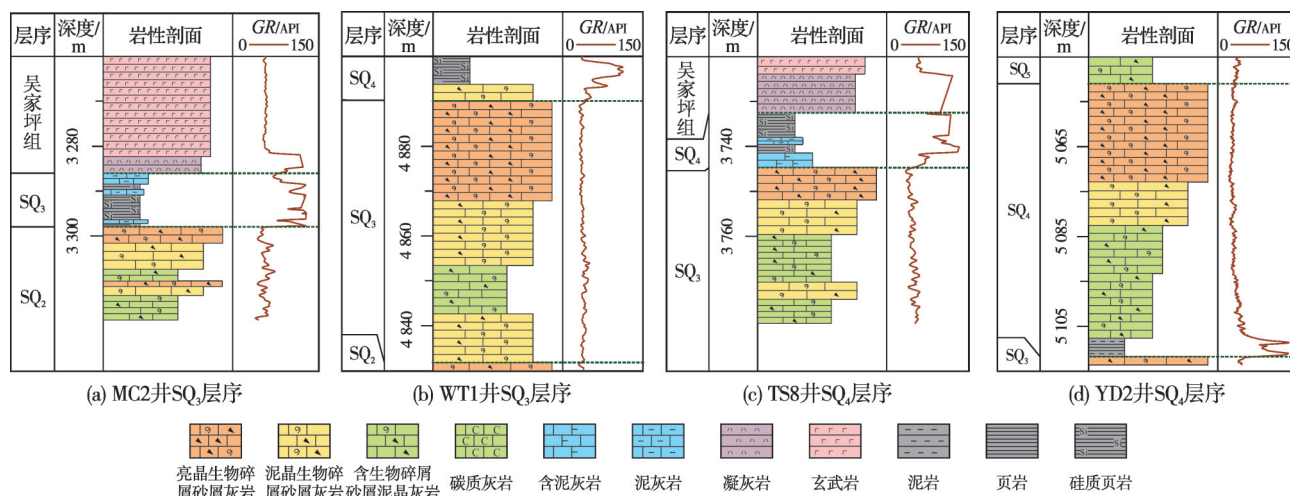


图7 川东茅口组SQ<sub>3</sub>、SQ<sub>4</sub>层序岩电响应特征

Fig. 7 Rock electrical response characteristics of SQ<sub>3</sub> and SQ<sub>4</sub> of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

井区一带,发育了较厚的颗粒滩沉积,岩性以生物碎屑砂屑灰岩为主(图7b),推测为弱镶边的台缘滩沉积。到 $SQ_4$ 沉积时期,研究区北东—南西向古地貌分异和沉积分异更加明显:东部持续沉降,欠补偿的深水沉积范围向西扩大到TS8井—QL1井区一带,岩性以硅质页岩、含生物碎屑泥晶灰岩为主,厚度较薄(图7c);深水沉积区以南,岩性主要为生物碎屑砂屑灰岩,厚度较大,推测为台缘颗粒滩沉积(图7d)<sup>[17,34]</sup>。因此, $SQ_3$ 和 $SQ_4$ 沉积期研究区沉积古地理格局总体上表现为西浅东深,推断为碳酸盐台地—陆棚体系,两者之间可能有坡折带的存在。茅口组沉积末期,东吴运动主幕导致上扬子台地整体抬升暴露遭受剥蚀(图5,图6e)。

## 4.2 油气储集意义

四川盆地茅口组碳酸盐岩岩溶储层具备较好的天然气储集条件<sup>[35-36]</sup>,近年来在研究区G4井、WT1

井、W67井、BD3井、S11井、JS1井等井茅口组中相继获得了高产工业气流。沉积相是控制碳酸盐岩优质储层发育与分布的一个关键要素<sup>[8]</sup>。台地边缘颗粒滩和开阔台地内颗粒滩为有利的储集相带<sup>[33,37]</sup>,其中,台缘颗粒滩的规模一般大于台内颗粒滩,且更容易遭受早成岩期岩溶作用的叠加优化改造,因而具有更好的储集物性<sup>[38-39]</sup>,是最有利的储集相带。综观研究区茅口组5个三级层序的地层分布(图6),只有 $SQ_3$ 和 $SQ_4$ 层序具备发育厚度较大的台缘颗粒滩沉积的有利条件,因此这两个层序是最有利于优质储层发育的层段(图8)。正如前述有关沉积古地貌演化的分析, $SQ_3$ 、 $SQ_4$ 沉积时期,研究区东部发育孤峰段以泥页岩、硅质页岩等为代表的深水沉积,其西侧发育了成排成带、以生物碎屑灰岩为代表的台缘滩和台内滩沉积。这些通常发育于海底古地貌高地上的颗粒滩体,尤其是较厚的、具有弱镶边特征的台缘滩体,更容易遭受早成岩期岩溶作用的叠加优化改造。

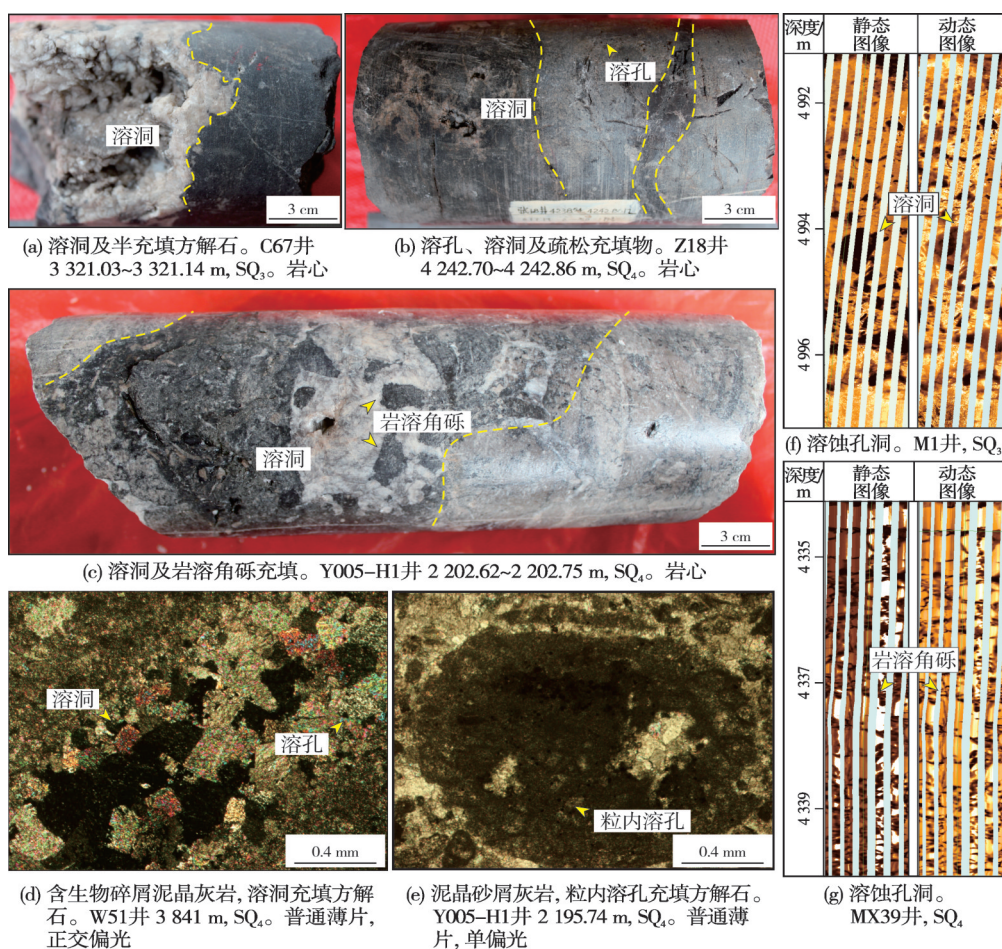


图8 川东茅口组 $SQ_3$ 、 $SQ_4$ 层序碳酸盐岩储层特征

Fig. 8 Carbonate reservoir characteristics of  $SQ_3$  and  $SQ_4$  of Maokou Formation in eastern Sichuan Basin



岩溶改造作用是海相碳酸盐岩形成优质储层的关键要素之一<sup>[35]</sup>。研究区茅口组发育有3个I型层序界面,其中茅口组内部SQ<sub>3</sub>与SQ<sub>4</sub>之间和茅口组与龙潭组之间的界面均为暴露侵蚀不整合面,界面之下的碳酸盐岩易遭受强烈的早成岩期岩溶改造,尤其是在SQ<sub>3</sub>与SQ<sub>4</sub>层序(茅二段—茅三段)灰岩内,形成了众多形态各异、以岩溶缝洞为代表的储集空间(图8),不仅在岩心中清晰可见,而且在成像测井上有明显的响应。由一期或两期以上的早成岩期岩溶作用形成的岩溶缝洞、残余孔洞以及大量溶蚀孔洞,在区域上控制了储集空间的分布。层序地层格架内有利储集相带与早成岩期岩溶改造的叠合,形成了茅口组富有特色的岩溶型灰岩储层。

## 5 结 论

(1)在四川盆地东部中二叠统茅口组中识别出3个I型层序界面和3个II型层序界面,据此将茅口组划分为5个三级层序。

(2)茅口组层序地层总体上具有下部超覆、顶部削蚀的特征:下部的SQ<sub>1</sub>层序表现出由东北往西南向海西期古隆起和古地貌高地超覆、减薄,顶部的SQ<sub>3</sub>层序因后期东吴运动造成的削蚀而残缺不全。

(3)茅口组层序格架内地层总体上表现出东西分异、厚薄相间的分布特点:SQ<sub>3</sub>、SQ<sub>4</sub>层序在研究区中部均发育有一个成带状展布的地层增厚带,可能对应于弱镶边的台缘滩相带;该带以东为地层减薄区,与发育孤峰段泥页岩、硅质页岩的深水沉积区吻合。

(4)层序地层格架内有利储集相带与I型层序界面下早成岩期岩溶改造的叠合,有利于茅口组形成富有特色的岩溶型灰岩储层。

### 参考文献

- [1] 张涛,林娟华,韩月卿,等.四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J].石油与天然气地质,2020,41(1):132-143,200.
- [2] 徐强,姜烨,董伟良,等.中国层序地层研究现状和发展方向[J].沉积学报,2003,21(1):155-167.
- [3] 马永生,陈洪德,王国力.中国南方层序地层与古地理[M].北京:科学出版社,2009:254-280.
- [4] 张翔,龚福华,李笑天,等.川东北大湾区块层序对储层的控制作用[J].科学技术与工程,2014,14(12):168-172.
- [5] 林良彪.川东二叠纪层序充填与沉积物分布规律[D].成都:成都理工大学,2008.
- [6] 王文飞.四川盆地东部中二叠统茅口组沉积与层序地层特征[J].断块油气田,2015,22(2):154-159.
- [7] 覃建雄,曾允孚,陈洪德,等.西南地区二叠纪层序地层及海平面变化[J].岩相古地理,1998,18(1):19-35.
- [8] 苏旺,江青春,陈志勇,等.四川盆地中二叠统茅口组层序地层特征及其对源储的控制作用[J].天然气工业,2015,35(7):34-43.
- [9] 李凤杰,刘殿鹤,郑荣才,等.四川盆地东北地区上二叠统层序地层特征研究[J].沉积学报,2009,27(6):1116-1123.
- [10] 张运波.四川盆地中二叠统层序地层及沉积模式[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- [11] 赵宗举,周慧,陈轩,等.四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J].石油学报,2012,33(增刊2):35-51.
- [12] 黎荣,胡明毅,杨威,等.四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布[J].石油与天然气地质,2019,40(2):369-379.
- [13] 张运波,王根厚,余正伟,等.四川盆地中二叠统茅口组米兰科维奇旋回及高频层序[J].古地理学报,2013,15(6):777-786.
- [14] 胡明毅,胡忠贵,魏国齐,等.四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J].石油勘探与开发,2012,39(1):45-55.
- [15] 张廷山,陈晓慧,刘治成,等.峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J].地质学报,2011,85(8):1251-1264.
- [16] 王海真,池英柳,赵宗举,等.四川盆地栖霞组岩溶储层及勘探选区[J].石油学报,2013,34(5):833-842.
- [17] 厚刚福,周进高,谷明峰,等.四川盆地中二叠统栖霞组、茅口组岩相古地理及勘探方向[J].海相油气地质,2017,22(1):25-31.
- [18] XIAO Di, ZHANG Benjian, TAN Xiucheng, et al. Discovery of a shoal-controlled karst dolomite reservoir in the Middle Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin, Southwest China [J]. Energy exploration & exploitation, 2018, 36(4): 686-704.
- [19] 陈宗清.四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J].中国石油勘探,2007,12(5):1-11.
- [20] 四川省地质矿产局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991:186-198.
- [21] 苏成鹏,谭秀成,王小芳,等.四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩储层特征及成因[J].海相油气地质,2020,25(1):55-62.
- [22] 邱威挺,古鸿信.试论川东北地区下二叠统孤峰组燧石(硅质岩)的沉积环境[J].岩相古地理,1991(6):1-8.
- [23] 吴勘,马强分,冯庆来.扬子板块北缘孤峰组地层划分及空间分布特征[J].地层学杂志,2015,39(1):33-39.
- [24] 张渝昌,秦德瑜,丁道桂,等.扬子地区古生代盆地构造格架和油气关系的若干初步认识[J].石油实验地质,1989,11(3):205-218.
- [25] 陈维涛,周瑶琪,马永生,等.关于龙门山地区东吴运动的存在及其性质的认识[J].地质学报,2007,81(11):1518-1525.
- [26] 李大军,陈辉,陈洪德,等.四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J].石油与天然气地质,2016,37(5):756-763.
- [27] 朱筱敏.层序地层学原理及应用[M].北京:石油工业出版社,1998:1-106.
- [28] 吴因业,邹才能,季汉成.中国层序地层学导论[M].北京:

- 石油工业出版社, 2005: 5-19.
- [29] 李凤杰, 陈荣林. 四川盆地东北地区中一下二叠统层序地层特征研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(5): 472-477.
- [30] 刘雁婷, 张文军, 熊治富, 等. 四川盆地东北部中二叠统层序地层特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(2): 47-53.
- [31] 占小刚, 赵俊省, 欧阳甜子, 等. 川东北普光地区二叠系茅口组古地貌恢复研究[J]. 四川地质学报, 2016, 36(2): 210-212.
- [32] 罗鹏, 李国蓉, 施泽进, 等. 川东南地区茅口组层序地层及沉积相浅析[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 74-78, 139.
- [33] 周进高, 郝毅, 邓红婴, 等. 四川盆地中西部栖霞组—茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 67-78.
- [34] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 8-15.
- [35] 唐雪松, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 731-743.
- [36] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 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): 39-50.
- [37] 严张磊, 邢凤存, 段金宝, 等. 川东北地区长兴组台缘礁滩带沉积结构及储集层分布[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(3): 311-317.
- [38] 胡东风. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 1-10.
- [39] 魏华动, 石桂鹏, 朱秀香, 等. 塔中西部良里塔格组台缘台内礁滩储层差异性[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 25-38.

编辑: 董庸

## Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

HU Luoia, HUANG Shiwei, TAN Wancang, TAN Xiucheng,  
SU Chengpeng, HU Sheng, LI Minglong, LIU Fei, FENG Liang

**Abstract:** By making full use of the core and logging data of more than 40 exploration wells, this paper divides the sequence stratigraphy of the Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin, analyzes the characteristics of the sequence boundary, establishes the isochronous sequence stratigraphic framework, summarizes the stratigraphic filling law, and discusses the sedimentary-paleogeographic pattern and the distribution of favorable reservoir areas in the sequence framework. Three type I sequence boundaries and three type II sequence boundaries of Maokou Formation are identified, and a new scheme for dividing Maokou Formation into five third-order sequences is proposed. The sequence stratigraphy of Maokou Formation generally has the characteristics of bottom overlap and top erosion. The bottom of SQ<sub>1</sub> overlap from northeast to southwest towards Hercynian paleouplift and paleogeomorphic highland, and the top of SQ<sub>3</sub> is missing in varying degrees due to the Dongwu movement. Generally, the strata in the sequence framework show the distribution trend of east-west differentiation and alternating thickness: a banded stratigraphic thickening zone is developed in the middle of the study area for SQ<sub>3</sub> and SQ<sub>4</sub> sequences, which probably correspond to shoal belt of the weakly bordered platform margin. To the east of this zone is the stratigraphic thinning area, which is consistent with the deep-water sedimentary area where mudstone, shale and siliceous shale are developed in Gufeng section. It shows the paleogeographic pattern of gradually deepening from west to east and from carbonate platform to shelf. It is pointed out that the superposition of favorable reservoir facies belt in sequence stratigraphic framework and early diagenetic karst transformation under type I sequence boundary is conducive to the formation of characteristic karst limestone reservoir in Maokou Formation.

**Key words:** sequence stratigraphy; stratigraphic filling; lithofacies-paleogeography; granular shoal; karst; Maokou Formation; eastern Sichuan Basin

**HU Luoia**, First author: MSc, mainly engaged in reservoir geology. Add: No. 12, north section of Tianfu Avenue, Wuhou District, Chengdu, Sichuan 610041, China

**TAN Xiucheng**, Corresponding author: Professor, PhD supervisor, mainly engaged in carbonate sedimentology and reservoir geology. Add: School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, No. 8 Xindu Avenue, Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China