

文章编号:1000-0550(2017)01-0117-07

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.012

# 塔里木盆地顺南地区中一下奥陶统正演沉积数值模拟

杨伟利,王毅,张众琛,梁晨,李京昌

中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083

**摘要** 利用正演沉积数值模拟,恢复了塔里木盆地顺南地区中一下奥陶统沉积演化过程。综合分析基础地质条件,以 Dionisos 软件为平台,建立了塔里木盆地顺南地区中一下奥陶统正演沉积数值模拟的初始模型。通过调整构造沉降、海平面变化、沉积物生产率、波浪强度和方向等参数及模型校验,以正演方法再现了该地区三维沉积演化过程,并分析了沉积旋回演化、关键界面特征和内部沉积格局。早中奥陶世,塔里木盆地顺南地区发育四个沉积旋回,四次相对海平面下降形成了中一下奥陶统蓬莱坝组下段、蓬莱坝组上段、鹰山组下段、鹰山组上段等顶面多个局部或区域短期暴露面,形成了非断裂控制的短期暴露岩溶。

**关键词** 正演沉积数值模拟;碳酸盐岩;中一下奥陶统;顺南地区;塔里木盆地

**第一作者简介** 杨伟利,男,1973年生,高级工程师,沉积、石油地质,E-mail:yangwl.syky@sinopec.com

**中图分类号** P618.13 **文献标识码** A

## 0 引言

顺南地区位于塔里木盆地塔中北坡,近几年在中一下奥陶统碳酸盐岩层见到良好油气显示,储层是控制油气富集的最主要因素。目前认为油气发现的主要储集空间为受北东向断裂控制的缝洞型储层,因此油气主要沿北东向断裂带展布。碳同位素地层学研究认为塔中北坡中一下奥陶统不存在地层缺失<sup>[1]</sup>,地震剖面上也难以发现明显的不整合接触特征,因此认为暴露条件下形成的岩溶储层欠发育。这些认识把制约油气富集的储层空间局限在断裂带附近,也制约了勘探空间的拓展。因此,通过沉积正演数值模拟恢复顺南地区中一下奥陶统沉积过程,为探索该地区是否发育形成岩溶储层的暴露背景具有重要意义,为下步油气勘探的拓展提供依据。

正演沉积数值模拟选用法国石油研究院的 Dionisos 软件实现。该软件是一个为沉积过程建模的工业应用软件,在碳酸盐岩建造和碎屑岩沉积过程中都得到了成功的应用。

## 1 Dionisos 沉积模拟基本原理及方法

沉积模拟是以沉积学理论研究为基础的一种重要的实验手段和技术方法,是对自然界真实过程的一种还原<sup>[2]</sup>。通过沉积实验,还原沉积过程和结果。对沉积过程进行抽象,提取其中的数学、物理规律以

及经验公式,然后通过计算机将这种规律加以实现,直观、形象地再现各种不同的沉积过程。

数值模拟根据模拟过程中的数据流向,可分为正演模拟和反演模拟。正演数值模拟输入的是控制参数,而反演数值模拟输入的是观察数据。正演模拟建立在假定过程参数和地层响应之间是相互依存的,通过调试过程参数的相互作用所产生的地层响应来模拟真实地质现象。

三维沉积数值模拟软件 Dionisos 是第一个再现沉积演化历史的模拟工业应用软件。可以充分利用岩芯、测井、地震等数据,应用层序地层学原理,通过模拟沉积物的沉积过程,定量评估构造沉降、海平面变化、沉积物供给、沉积搬运和可容空间之间复杂的相互作用关系,为沉积盆地的演化建立一个理想的地质历史模型,如地层、岩相、沉积建造、古水深在时间和空间上的演化。物质平衡原理的应用使得 Dionisos 可以模拟盆地每个时间和空间点的沉积或者剥蚀作用,因此可以进一步模拟盆地的变形和沉积充填,三维定量描述沉积体的形态,提供沉积盆地中沉积建造、地层岩相、古水深在空间和时间上的演化。

## 2 工区概况

模拟工区包括塔里木塔中北坡的顺南地区和古城墟隆起西部地区(图1)。寒武纪—早奥陶世,塔里木周缘处于拉张背景,盆地内部构造稳定,塔中隆起

尚未形成,该地区为东盆西台的结构。中晚奥陶世,随着塔里木周缘区域动力学背景转换及盆地内部响应,塔中隆起逐渐形成,加里东中晚期断裂体系开始发育。顺南斜坡位于塔中I号带下盘,现今整体表现为南东高、北西低的斜坡,并在西北部和东南部发育顺托果勒低隆和古城墟隆起,“东西分区”的构造格局明显。多条北东向、北东东向走滑构造带将塔中北坡与卡塔克隆起分割成东西不同的块体。

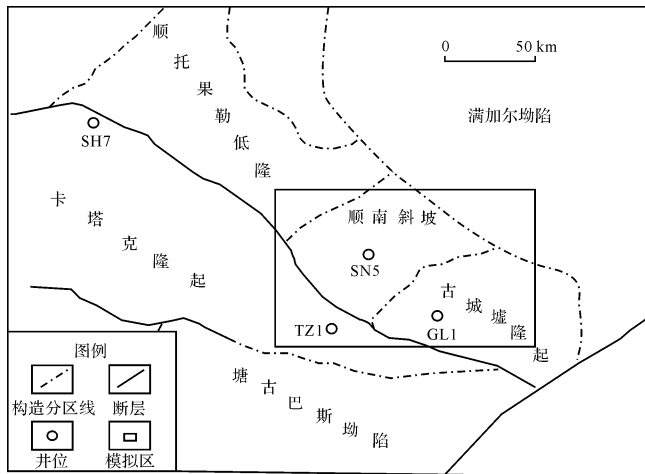


图1 模拟工区位置图

Fig.1 The simulated area in Tarim Basin

研究区发育以碳酸盐岩为主的寒武系、中一下奥陶统和上奥陶统良里塔格组,以碎屑岩为主的上奥陶统桑塔木组—新生界。本次研究层位为中、下奥陶统蓬莱坝组、鹰山组、一间房组。塔里木主体区域在早奥陶世继承了晚寒武世的沉积面貌<sup>[3]</sup>,主要发育开阔台地、台地边缘、台地斜坡、深水盆地相。蓬莱坝组岩性为浅灰、褐灰色薄—中厚层状泥—粉晶灰岩、砂屑灰岩、云质灰岩与粉—细晶白云岩互层;鹰山组岩性为灰色中厚层状球粒泥晶灰岩、藻凝块泥晶灰岩夹砂屑灰岩、云质灰岩、灰质云岩和白云岩;一间房组岩性为灰、深灰色厚层状泥晶生物碎屑灰岩及浅灰、灰白色厚层状礁灰岩。

### 3 模拟初始模型

初始模型需要确立工区的范围、初始基底和模拟时间。本次模拟工区为长 136 km、宽 86 km 的矩形区域,模拟时间为中一下奥陶统蓬莱坝组—一间房组沉积时期,即488.3~460.9Ma,初始模型采用蓬莱坝

组沉积初期即 488.3 Ma 时的古水深。

古水深的确定有多种方法<sup>[4-6]</sup>,根据塔里木盆地实际情况,主要采用以沉积相为主、辅助古生物特征确定古水深。一般认为克拉通盆地水深在 5~10 m<sup>[7]</sup>,对塔里木早古生代古水深而言,处于斜坡以上的台地沉积区域其海水深度小于 10 m。金之钧等<sup>[8]</sup>曾依据沉积相带和古生物资料对塔里木盆地的古水深进行了系统分析,提出塔东地区早寒武世古水深 200~1 000 m,中寒武世古水深 200~2 000 m,晚寒武世古水深 200~700 m。早奥陶世继承了晚寒武世的古地理格局,在斜坡区以下的区域,水深应该不小于 700 m,但具体多少尚无方法来确定。

综合沉积相、沉积岩性、古生物特征及前人研究成果,半定量地确定出早古生代塔里木盆地的古水深,台地相区水深 10 m,盆地相区 700 m,斜坡带处于过度水深。在区域相带转换处的蓬莱坝组沉积初期水深图上,截取研究区古水深,由散点的形式导入 Dionisos 软件,并经过变差函数运算和平滑运算,最终得到初始基底的模型(图 2)。

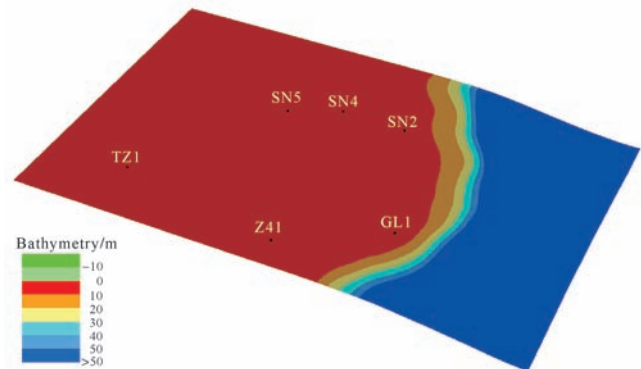


图2 顺南地区正演数值模拟初始模型

Fig.2 The forward numerical sedimentary simulation model of Shunnan area

## 4 模拟参数

碳酸盐岩沉积数值正演模拟中需要三类参数:可容空间(构造沉降、海平面变化和沉积物供给)、物质(沉积物类型、产率)、能量(波浪方向、波浪能量)。

### 4.1 构造沉降

构造沉降采用艾里均衡公式计算的结果<sup>①</sup>。基本原理是根据质量守恒法则,假设地层的骨架厚度不随埋深的增加而发生改变。构造作用引起的沉降

① 云金表,杨伟利,李京昌,等.塔里木下古生界碳酸盐岩层系古构造演化研究,2013.

( $S_{TT}$ )和负荷均衡作用引起的沉降( $S_L$ )组成了盆地在某一时刻的基底总沉降量( $S_T$ )。构造作用引起的沉降运动是被构造沉降所反映的,表示为:

$$S_{TT}(t) = S_T(t) - S_L(t) \quad (1)$$

式中  $S_{TT}(t)$  为时刻  $t$  的构造沉降量;  $S_T(t)$  为时刻  $t$  的基底总沉降量, 可以用时刻  $t$  盆地的古地层厚度  $H_s(t)$  + 古水深  $H_w(t)$  表示;  $S_L(t)$  是指时刻  $t$  由盆地地层负荷引起的沉降量, 可由艾里均衡公式求得。即:

$$S_L(t) = H_s(t) (\rho_s - \rho_w) / (\rho_m - \rho_w) \quad (2)$$

式中古地层厚度  $H_s(t)$  是用回剥方法确定的, 在这里可用现今测得的沉积厚度进行计算, 因为白云岩和灰岩是寒武系的主要岩性, 可以认为其不存在沉积压实作用。  $\rho_s$  是盆地沉积层的平均密度,  $\rho_m$  和  $\rho_w$  是地幔和水在  $0^\circ\text{C}$  时的密度。由于白云岩为寒武系的主要岩性, 故  $\rho_s$  取值  $2\ 870\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_m$  取值  $3\ 330\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_w$  取值  $1\ 030\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

由上面的(1)式和(2)式可得出构造沉降量的计算公式:

$$S_{TT}(t) = H_s(t) + H_w - H_s(t) (\rho_s - \rho_w) / (\rho_m - \rho_w) \quad (3)$$

由上式得到的即为总沉积量去掉沉积负载作用影响之后的构造沉降量(图3)。从构造沉降看, 工区南部沉降幅度小, 北部幅度大, 总体上分布在  $900 \sim 1\ 200\ \text{m}$ 。

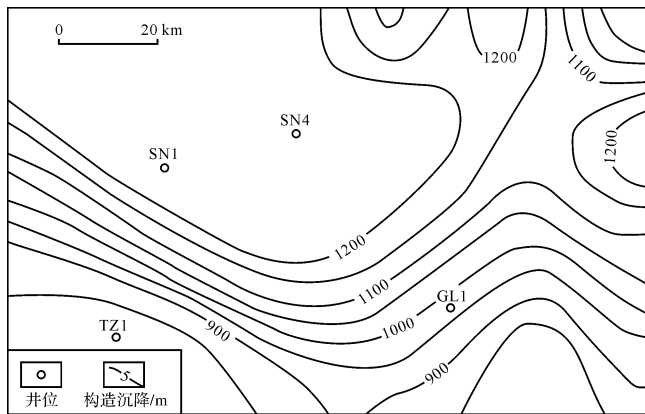


图3 顺南模拟工区早中奥陶纪构造沉降量

Fig.3 Early-Middle Ordovician tectonic subsidence quantity in Shunnan area

## 4.2 海平面升降

海平面的变化对于沉积相的迁移、碳酸盐缓坡—台地的形成和演化、沉积类型都有影响。海平面分为绝对海平面和相对海平面两种, Dionisos 软件中使用的是绝对海平面。目前有多种方法确定海平面变化<sup>[9-10]</sup>, 包括上超曲线法、测井曲线法、层序体系域

法、海岸上超法、沉积相序法、群落生态法、稳定同位素法、数学模型法、Fishier 图解法等, 这些方法反应的是海平面的变化趋势或者相对海平面变化, 目前很难得到绝对海平面变化。通过对全球海平面变化曲线、塔里木地区不同方法得到的海平面变化曲线分析, 本次选用高志前等<sup>[11]</sup>根据塔里木盆地巴楚、塔中地区4口井和柯坪露头剖面的微量元素数据、锶同位素、碳氧同位素数据, 利用塔中1井的碳氧同位素资料编制的海平面升降变化曲线, 虽然也代表了相对海平面变化, 但是就碳同位素背景演化曲线而言, 它具有全球的一致性, 可能反映了全球大范围的海平面变化规律<sup>[12]</sup>。

## 4.3 沉积物产率

碳酸盐岩产率主控因素包括确定各种岩性产率与水深、时间的定量关系。通过对钻井和地震反射结构分析, 确定了研究区三种主要沉积物类型: 灰岩、泥岩和礁滩灰岩。礁滩灰岩代表生物礁障壁体系(珊瑚、藻类)及高能沉积物的所有沉积, 灰岩代表正常水动力条件下的碳酸盐岩沉积, 泥代表开放海洋环境下的沉积。在 Dionisos 中, 沉积物产率与水深的关系用  $0 \sim 1$  的范围表示, 1 代表该类型沉积物达到最大产率, 0 代表沉积物停止沉积或碳酸盐岩停止生长。我国现代珊瑚礁的生长带水深范围在  $3 \sim 18\ \text{m}$ <sup>[13]</sup>, Dodd *et al.*<sup>[14]</sup>认为, 现代珊瑚礁在  $15\ \text{m}$  以浅水深范围内生长最丰富, 吴亚生等人<sup>[6]</sup>认为珊瑚礁亮晶骨架相水深范围为  $2 \sim 10\ \text{m}$ 。大部分灰岩形成在水体清浅暖环境下, 水深以下  $10 \sim 20\ \text{m}$  是光照强度饱和区<sup>[15]</sup>。考虑到塔里木盆地顺南地区礁滩发育的高能环境, 定义礁滩、灰岩沉积物最大产率的水深是  $0 \sim 20\ \text{m}$ , 水深大于该值则逐渐降低, 礁滩沉积产率随着水深的增加呈指数递减, 灰岩产率则随着水深的增加逐渐递减。由于没有外部物源, 泥的沉积主要是在斜坡及盆地区, 在一定深度内随水深增加产率增加(图4)。产率和时间的关系可以根据钻井地层厚度计算, 该地区选用古隆1井计算灰岩产率, 结果如图5所示, 礁滩产率很高, 泥产率很低。沉积物产率, 特别是水深和产率的关系是一个可控参数, 根据实际情况进行反复尝试与调整, 最终采用图4、5中所示结果。

## 4.4 能量参数

能量参数需要定义波浪大小和方向。软件中可以定义两套波浪: 正常海浪和风暴浪, 用基准深度、波浪传播角度和频率表达。基准深度是波浪影响开始减少的参考深度, 它等于浪基面除以 2.5。浪基面深

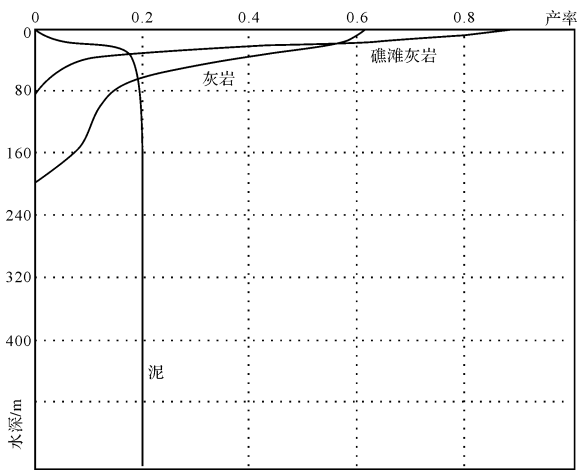


图4 沉积物产率与水深的关系

Fig.4 The relation between deposition rate and water depth

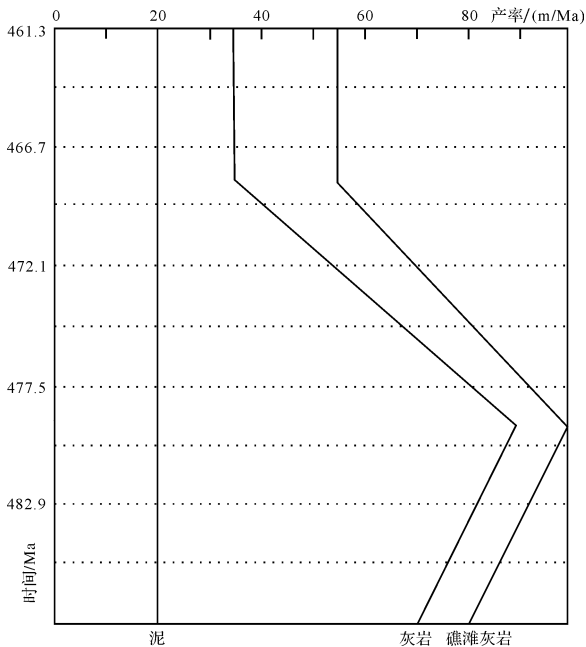


图5 沉积物产率与时间的关系

Fig.5 The relation between deposition rate and geological time

度认识不一,一般认为在20多米,此处选取25 m。风暴浪浪基准深度认识差异也比较大,一般风暴浪波及深度在40~50 m<sup>[16-17]</sup>。因此,在能量参数的确定中,正常海浪基准深度设定在5~15 m范围,风暴浪基准深度范围设定为10~25 m。波浪传播的角度以斜交和垂直岸线为主,变化范围15°~150°。波浪的频率指波浪类型在一年中出现的频率,全年中都是好天气则波浪定义为100%,风暴天气仅仅在一年中很小一部分时间发生。设置正常波浪作用频率是100%,风暴浪的作用频率为25%。

在构造沉降、海平面变化、沉积物产率和能量参数中,构造沉降和海平面变化是不变的量,沉积物产率和能量参数是可控的。沉积物产率调整的是随水深度的关系,最大产率的水深范围参数在0~10 m、0~20 m两组中调整。能量参数中,基准深度中正常和风暴浪基准深度在5 m和10 m、10 m和15 m、15 m和20 m三组中调整;波浪传播角度则在15°、45°、75°、105°、135°中调整。通过对各种条件下沉积演化过程模型的分析,最终确定最大产率为0~10 m、基准深度10 m和15 m、波浪传播角度75°条件下的模型和实际最接近。

## 5 沉积模拟结果正确性分析

通过对模拟结果的模拟单井沉积旋回、连井剖面及台地结构等方面与实际资料进行对比,局部地区和三维地震资料恢复的古地貌做了对比验证了模拟结果的正确性。

### 5.1 单井对比

以沉积正演数值模拟的结果生成模拟井剖面,通过与实际井剖面对比验证模拟结果正确性。根据该地区钻井完钻实际层位大部分在鹰山组,对比分析了顺南1、顺南5、顺南2、古隆2和古隆1等单井及连井鹰山组——一间房组沉积旋回。以位于台地边缘的古隆1井鹰山组为例(图6),古隆1井鹰山组实钻厚度450 m,模拟井沉积厚度430 m;实际钻井中高能沉积环境中沉积的亮晶颗粒灰岩与模拟井中高能沉积物进行对比基本吻合;实钻井小波变换得到的准层序与模拟井岩性变化划分的准层序对比显示,大部分准层序是一致的,只是中一下部略微有差异,实际井小波变换得到的准层序频率比模拟井略多,符合率在80%以上,说明正演模拟结果与实际相符。

### 5.2 地层结构对比

从该地区地震反射结构看,台地内部反射结构稳定,台地边缘在下奥陶统蓬莱坝组(T<sub>7</sub><sup>8</sup>界面之下)向斜坡方向迁移,代表一种进积结构。之后,台地边缘稳定不变,代表了一种加积结构。沉积正演数值模拟的三维结构显示,早奥陶世早期,在晚寒武纪沉积格局之上出现了短暂的进积过程,此后,以相对比较稳定的加积型为主。在台地边缘形成了相对比较稳定的礁滩建隆。模拟结果与地震反射结构显示一致(图7)。

## 6 讨论

数值沉积模拟结果显示,该地区从奥陶纪蓬莱坝

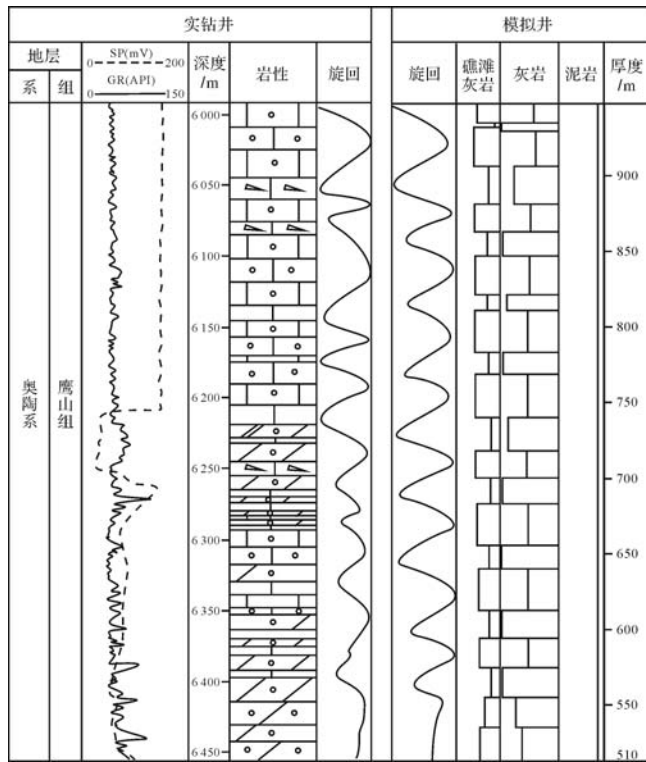


图6 模拟井与实钻井剖面对比(古隆1井)  
Fig.6 The comparison of the modelling section and the drilling section in Well GL1

盖;此后,海平面上升,水体加深,到 487.05 Ma,工区内部分化,水体分布不均,形成台地内部洼地,代表一次短暂海侵;随后海平面下降,到 485.55 Ma,洼地周缘部分露出水面,接受短时间的暴露侵蚀,代表了一次水退结果。到 482.05 Ma,相对海平面上升,研究区被淹没,早期暴露地区形成淹没不整合;到蓬莱坝组沉积结束(479.3 Ma),该地区水体完全退出到斜坡带以下,台地区完全暴露,是一次比较大的海退。鹰山组沉积时期,随着可容空间变化,该地区也经历了几次相对海平面变化。在这种短期暴露之下,局部地区形成了中一下奥陶统内部小规模平行不整合、微角度不整合、暴露侵蚀面等,在该界面之下发育一系列具有暴露或侵蚀标识的溶洞特征或在地震上界面之下串珠集中分布。

从模拟结果看,顺南地区中一下奥陶统内部并不是目前所认识的不存在地层缺失,而是存在多个内部暴露界面。碳同位素地层学揭示的地层间断是一个大尺度间断界面,相对小尺度间断则无法识别。模拟工区显示即为一个短时间内的沉积间断,沉积间断时间在 1 Ma 左右,剥蚀作用比较弱,在地震剖面上也没有形成明显的削截、上超等特征的反射结构。区域动力学环境分析认为该时期是一个区域应力场由拉张转换为挤压的过程,相对海平面下降应该是应力转换在盆地内部的响应和区域海平面变化综合作用的结果。这种综合结果导致了中一下奥陶统内部发育多次短时间暴露,形成了短期暴露岩溶背景。

模拟结果揭示的短期暴露岩溶背景对油气勘探具有重要的现实意义。一是为该地区发育  $T_4^1$  界面之下的面状储层提供了参考依据(滩相储层、短期暴露岩溶储层)。在中一下奥陶统内部尚未发现大的溶洞,但是地震资料揭示了中一下奥陶统内部多个代表储层发育的串珠存在,局部地区还经过了热液改造,改善了储集空间的储集性能,因此,改变了储集空间局限于断裂带附近的裂缝型储层认识。二是可以成为早期油气聚集的场所。寒武系底部玉尔吐组烃源岩是塔里木重要的一套烃源岩,从热演化模拟结果看,该套烃源岩到加里东早中期已经达到生油高峰,而该时期塔里木盆地最重要的加里东中期 I 幕界面 ( $T_4^1$ ) 尚未形成及埋藏,那么早期生成的原油最有利的聚集场所只有中一下奥陶统内部储层,也即模拟揭示的储层可能是早期原生气藏发育的场所。因此,模拟取得的认识为甩开断裂带油气勘探和向深部拓展提供了良好的依据。

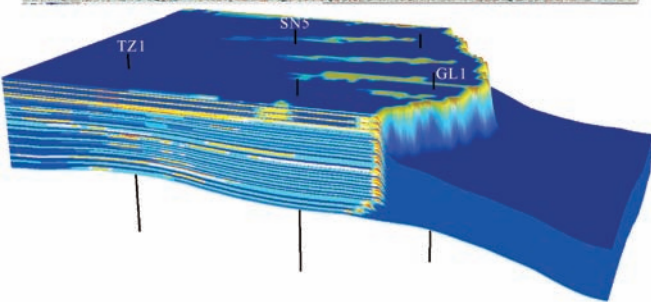
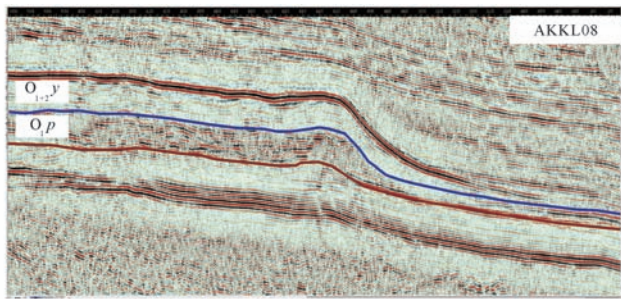


图7 模拟地层结构与地震反射结构对比  
Fig.7 The geometry comparison of the seismic reflection and the simulation model

组沉积开始,经历了四期沉积旋回,在台地区形成了多期暴露或局部暴露,即形成了暴露不整合(图8)。蓬莱坝组沉积初期(488.3 Ma),台地区全部被水体覆

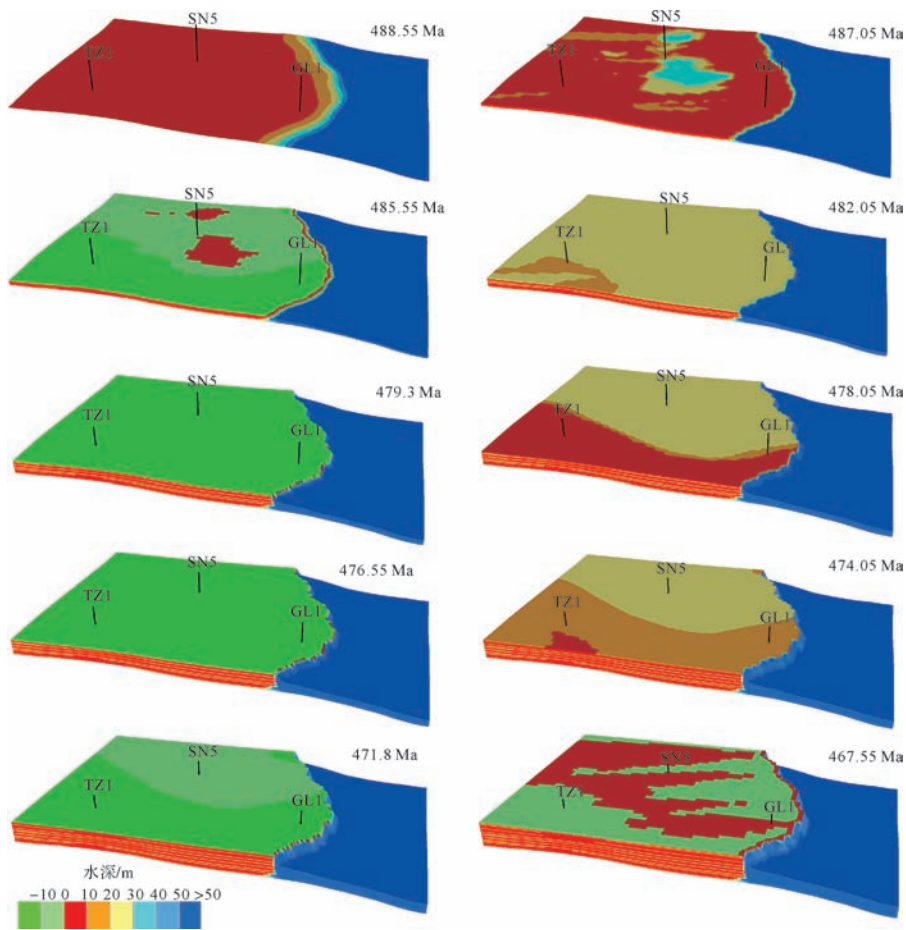


图8 顺南地区不同时期的模拟水深

Fig.8 The simulation water depth in Shunnan area

### 参考文献 (References)

- [1] 张智礼,李慧莉,谭广辉,等. 塔里木中央隆起区奥陶纪碳同位素特征及其地层意义[J]. 地层学杂志, 2014, 38(2): 181-189. [Zhang Zhili, Li Huili, Tan Guanghui, et al. Carbon isotope chemostratigraphy of the Ordovician system in Central Uplift of Tarim Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(2): 181-189.]
- [2] 李翔. 沉积盆地充填过程的计算机模拟研究[J]. 现代地质, 1994, 8(4): 393-402. [Li Xiang. Computer simulation of sedimentary basin fill[J]. Geoscience, 1994, 8(4): 393-402.]
- [3] 刘迪,张哨楠,谢世文,等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系鹰山组层序地层特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 55-64. [Liu Di, Zhang Shaonan, Xie Shiwen, et al. Characteristics of sequence stratigraphy of the Ordovician Yingshan Formation in the central part of Tarim Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(1): 55-64.]
- [4] 万锦峰,鲜本忠,余源琦,等. 基于伽马能谱测井信息的古水深恢复方法——以塔河油田4区巴楚组为例[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 98-103. [Wan Jinfeng, Xian Benzong, She Yuanqi, et al. Palaeobathymetric reconstruction based on natural gamma ray spectrometry logging data-by taking Bachu Formation in region 4 of Tahe oilfield for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6): 98-103.]
- [5] 王敏芳,焦养泉,任建业,等. 沉积盆地中古地貌恢复的方法与思路——以准噶尔盆地西山窑组沉积期为例[J]. 新疆地质, 2006, 24(3): 326-330. [Wang Minfang, Jiao Yangquan, Ren Jianye, et al. Method and thinking of Palaeogeomorphologic reconstruction in sedimentary basin-Example from depositional stage of Xishanyao Formation in Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(3): 326-330.]
- [6] 吴亚生,范嘉松. 根据生物礁定量计算茅口期全球海平面变化幅度[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2001, 31(3): 233-242. [Wu Yasheng, Fan Jiasong. Calculating eustatic amplitude of Middle Permian from reefs[J]. Science China (Ser. D): Earth Sciences, 2001, 31(3): 233-242.]
- [7] 贾振远,李之琪. 碳酸盐岩沉积相和沉积环境[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 1-186. [Jia Zhenyuan, Li Zhiqi. Carbonate Sedimentary Facies and Sedimentary Environment [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989: 1-186.]
- [8] 金之钧,吕修祥,王毅,等. 塔里木盆地波动过程及其控油规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-134. [Jin Zhijun, Lü Xiuxiang, Wang Yi, et al. Wave Process and Its Oil-Controlling

- Law of Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-134.]
- [9] 李祥辉,张洁. 海平面及海平面变化综述[J]. 岩相古地理, 1999,19(4):61-72,41. [Li Xianghui, Zhang Jie. Problems and suggestions on sea-level and its changes[J]. Sedimentary Facies and Paleogeography, 1999, 19(4): 61-72, 41.]
- [10] 赵玉光,刘宝珺,许校松. 地质历史时期海平面变化曲线的数学模型[J]. 地球科学,2000,25(2):117-121. [Zhao Yuguang, Liu Baojun, Xu Xiaosong. Mathematical model of sea-level change curves in geological history[J]. Earth Science, 2000, 25(2): 117-121.]
- [11] 高志前,樊太亮,李岩,等. 塔里木盆地寒武奥陶纪海平面升降变化规律研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(4):549-556. [Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Li Yan, et al. Study on eustatic sea-level change rule in Cambrian-Ordovician in Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(4): 549-556.]
- [12] 李玉成. 华南晚二叠世碳酸盐岩碳同位素旋回对海平面变化的响应[J]. 沉积学报,1998,16(3):52-53,55-57. [Li Yucheng. The carbon isotope cyclostratigraphic responses to sea level change in Upper Permian limestone from South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 52-53, 55-57.]
- [13] 吕炳全,王国忠,全松青. 海南岛珊瑚岸礁的特征[J]. 地理研究,1984,3(3):1-16. [Lü Bingquan, Wang Guozhong, Quan Songqing. The characteristics of fringing reefs of Hainan Island[J]. Geographical Research, 1984, 3(3): 1-16.]
- [14] Dodd J R, Stanton R J. Paleoeecology, Concepts and Applications [M]. New York: John Wiley and Sons, 1981: 1-559.
- [15] 郑艳刚,袁美云,徐维胜. 台地边缘生物礁生长规律和控制因素综合研究[J]. 内蒙古石油化工,2009,34(6):111-112. [Zheng Yangang, Yuan Meiyun, Xu Weisheng. Study on growth rule and control factors of platform edge reef[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 34(6): 111-112.]
- [16] 金振奎,石良,高白水,等. 碳酸盐岩沉积相及相模式[J]. 沉积学报,2013,31(6):965-979. [Jin Zhenkui, Shi Liang, Gao Baishui, et al. Carbonate facies and facies models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 965-979.]
- [17] Brett C E, Boucot A J, Jones B. Absolute depths of Silurian benthic assemblages[J]. Lethaia, 1993, 26(1): 25-40.

## A Three-dimensional Numerical Sedimentary Simulation Model for the Lower-Middle Ordovician of Shunnan Area, Tarim Basin

YANG WeiLi, WANG Yi, ZHANG ZhongChen, LIANG Chen, LI JingChang

Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

**Abstract:** The numerical sedimentary forward simulation of Lower-Middle Ordovician of Shunnan area in Tarim Basin was presented by means of software Dionisos, which are controlled by primary model, tectonic subsidence, fluctuation of sea level, sedimentation rate and wave energy. Through the validation, the appropriate model has been chosen and then the sedimentary process is clear. The evolution of this area has four depositional cycles. The distribution of carbonate reef, beach and short-time exposed surfaces has been analyzed. During Early-Middle Ordovician, there developed four frequent short-time exposure surfaces which occurred at the top of the depositional cycle in Shunnan area and resulted in the formation of vugular-pore in carbonate deposits subjected to leaching and dissolution of meteoric fresh water, leading to which makes a change that only the fracture dominates the development of the carbonate reservoir.

**Key words:** sedimentary simulation; the lower-middle Ordovician; carbonate; Shunnan area; Tarim Basin