

多元约束的古岩溶碳酸盐岩洞穴储层分布建模方法

——以塔河油田奥陶系油藏为例

刘钰铭^{1*}, 侯加根¹, 李永强^{1,2}, 马晓强¹, 董越¹, 宋随宏¹

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

* 通信作者, liuym@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-09-27

国家科技重大专项(2016ZX05014-002、2016ZX05010-001)、中国石油大学(北京) 自然科学基金(KYJJ2012-01-19) 联合资助

摘要 不同于常规碎屑岩储层, 碳酸盐岩古岩溶洞穴储层有其独特的成因和分布规律, 等时建模和沉积相相控建模等传统建模策略已不适用于该类储层。本文以塔里木盆地塔河油田奥陶系油藏为例, 在洞穴储层类型识别与划分的基础上, 提出了大型断裂、岩溶带和地震波阻抗数据综合约束的洞穴储层三维分布建模新方法, 建立了洞穴储层三维分布模型。主要采用了带有趋势的高斯克里金模拟方法, 通过基于最优估计的数据融合理论将三类约束数据充分整合作为模拟的趋势约束数据。结果表明, 模拟结果与累积产量数据吻合较好。

关键词 古岩溶洞穴储层; 储层建模; 塔河油田; 多元约束

0 引言

古岩溶碳酸盐岩储层以大型岩溶洞穴为主要储集空间, 非均质性严重, 储层建模难度大^[1-9]。为提高建模过程中井间预测的准确性, 已有学者对该类特殊储层的地质建模进行了探索研究。最初, 王根久等(2002)^[10]、赵敏等(2008)^[11]采用地震属性约束建立了储层孔隙度三维模型; 杨辉延等(2004)^[12]、张淑品等(2007)^[13]在岩溶带控制下建立了储层属性模型。后来, 赵彬等(2011)^[14]、刘钰铭等(2012、2018)^[15-16]提出了基于垂向岩溶带划分和平面岩溶地貌分区的建模思路, 加强了地质因素在建模中的控制作用; 在此基础上, 侯加根等(2012、2013)^[17-18]、马晓强等(2013)^[19]提出了基于储集体尺度分类的“多类多尺度建模”方法。这些方法大多采用单一因素约束建模, 而古岩溶洞穴

储层空间分布复杂且随机性强, 单一因素约束建模难以保证建模结果的准确性; 此外, 随着油田生产对地质模型的要求日益提升, 也亟需研究更可靠的建模方法。因此, 本文拟以塔河油田奥陶系油藏为研究对象, 细分古岩溶洞穴储层类型, 建立不同类型古岩溶洞穴储集体三维分布模型及相应的储层物性模型, 探讨针对古岩溶碳酸盐岩洞穴储层的建模方法, 以期进一步揭示该类储层非均质特征。

1 研究区概况

塔河油田位于塔里木盆地北部坳陷区沙雅隆起南翼的阿克库勒凸起斜坡带上, 西邻哈拉哈塘凹陷, 东靠草湖凹陷, 南接满加尔坳陷, 北部为雅克拉-轮台断凸(图1)。塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶属风化壳

引用格式: 刘钰铭, 侯加根, 李永强, 马晓强, 董越, 宋随宏. 多元约束的古岩溶碳酸盐岩洞穴储层分布建模方法——以塔河油田奥陶系油藏为例. 石油科学通报, 2018, 02: 125-133

LIU Yuming, HOU Jiagen, LI Yongqiang, MA Xiaoliang, DONG Yue, SONG Suihong. A multi-constrained modeling method for paleokarst carbonate reservoirs: An application to the Ordovician reservoir in the Tahe Oilfield. Petroleum Science Bulletin, 2018, 02: 125-133. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.013

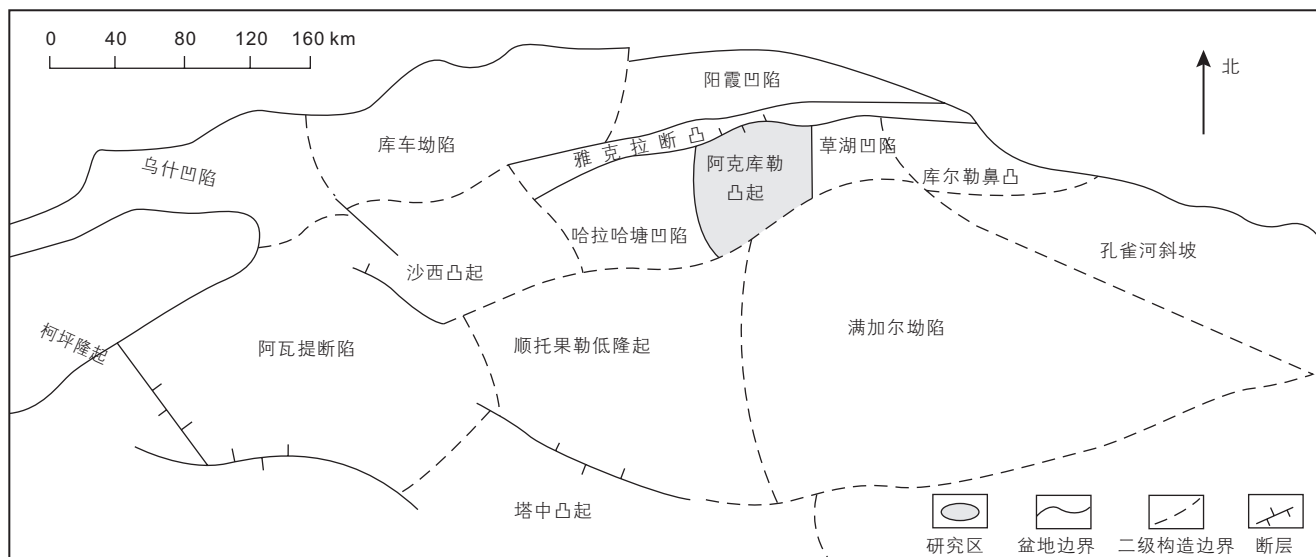


图1 塔河油田构造位置图

Fig. 1 Structural map showing the location of Tahe Oilfield

岩溶, 主要发育于海西早期, 海西早期强烈的构造抬升、褶皱和断裂活动, 造成志留—泥盆系、上奥陶统的普遍剥蚀、缺失, 中—下奥陶统顶部也受到部分剥蚀, 形成区域性不整合面(风化壳)^[3]。1997年塔河油田奥陶系油藏发现并投入开发^[9], 根据油田开发管理, 塔河油田奥陶系古岩溶油藏分为塔河主体区的二、三、四、六、七、八区及外围的十、十一、十二区、S72井区等多个开发区, 每个开发区又进一步分为若干单元。本文选取塔河油田四区S48单元为研究对象。S48单元面积为13.9 km², 共有钻井24口, 是塔河油田四区最大的开发单元, 也是塔河油田奥陶系油藏最早的开发单元。目前该单元已进入产量递减阶段, 注水、注气开发是其主要开发方式, 开发方案的调整迫切需要建立精确的三维地质模型。

2 洞穴储层类型与识别

2.1 洞穴储层类型细分

从储集单元成因和形态分析出发, 将洞穴储集体分为暗河型洞穴、落水洞型洞穴、内部离散洞穴3种储层类型。

2.1.1 暗河型洞穴

暗河, 又称地下河, 是由地下水汇集, 或地表水沿地下岩石裂隙渗入地下, 经过岩石溶蚀、坍塌以及水的搬运而形成的地下岩溶管道, 多发育于水平潜流带上部(又称“饱水带”)。暗河往往横向发育, 在平

面上可分支分叉, 组成管道网络, 垂向上由于地下水位波动, 亦可形成多层河道^[20]。

2.1.2 落水洞型洞穴

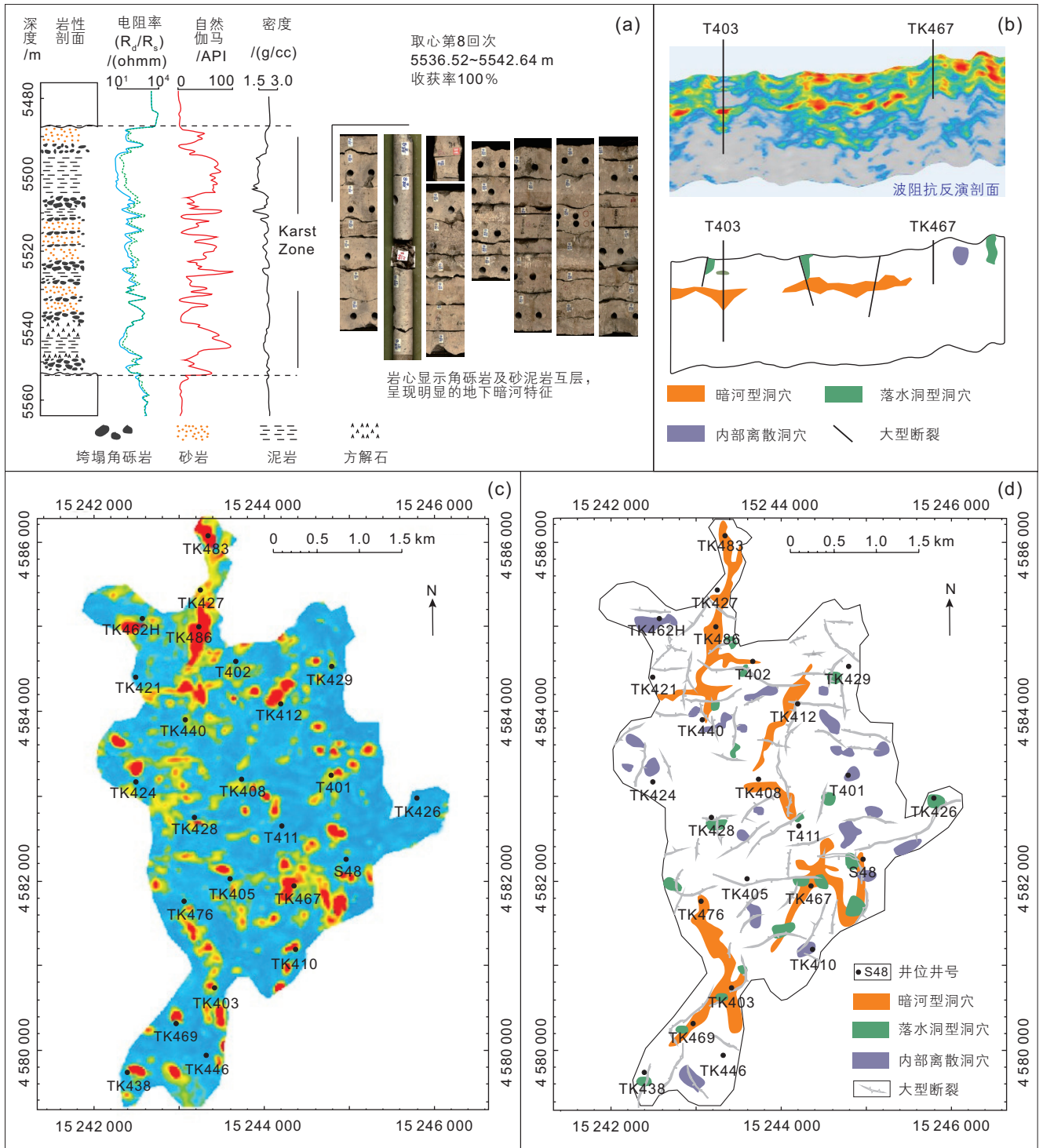
落水洞是地表水沿垂直裂隙进行溶蚀、冲蚀, 使裂隙扩大并伴随部分崩塌作用的产物, 也是岩溶水从地表到地下暗河的主要通道。主要发育于近地表的垂向渗流带(又称“包气带”), 表面形态与漏斗相似, 整体上可呈裂隙状、筒状、锥状或袋状。

2.1.3 内部离散洞穴

暗河型洞穴与落水洞型洞穴的发育都需要相对稳定的岩溶条件和一定的岩溶作用时间, 若局部岩溶作用由于某些条件发生变化而终止的话, 比如潜水面的变化, 则这些区域发育的洞穴就会停止扩大, 而相对孤立地保存下来。它可以是暂时性水流沿裂缝垂直下渗在碳酸盐岩内部形成的溶蚀扩大洞穴, 也可能是短时性水平流动形成的地下河的雏形。但考虑到地下资料的局限, 而无法将其清楚分开, 本文统称为内部离散洞穴。

2.2 洞穴储层类型单井识别

单井上识别的洞穴储层数据, 是建模过程中最直接的数据输入。人们已能从钻井放空漏失信息, 并结合地震剖面“串珠状”反射等特征在单井上识别洞穴的发育层段^[21-22], 但仍需进一步判别洞穴的类型。本文提出了在单井上进一步判断洞穴储层类型的3点依据。一是洞穴充填物的差异, 暗河型洞穴钻井取心常见砂泥等外部搬运沉积物, 其对应自然伽马曲线发育明显高值段(图2a), 而落水洞型洞穴和内部离散洞穴



(a) T403 井洞穴段岩性剖面及部分岩心照片；(b) T403 井-T467 井波阻抗反演剖面及相应的储层分布剖面；
 (c) S48 单元奥陶系顶部不整合面以下 20 ms 地震均方根振幅切片；(d) S48 单元奥陶系洞穴储层类型平面预测图
 图 2 洞穴储层类型综合识别(据参考文献^[16,19], 有修改)

Fig. 2 Comprehensive identification of cavernous reservoirs (modified from reference^[16,19])

一般无砂泥等搬运沉积物；二是地震响应差异，暗河型洞穴的响应(如反演波阻抗数据)在剖面上往往横向发育，在平面上有一定的延伸规模，而落水洞型洞穴与内部离散洞穴规模相对小(图 2b, 2c, 2d)，且落水

洞型洞穴沿纵向发育特征较明显；三是发育深度的差异，落水洞型洞穴大多从风化壳(不整合面)开始向下发育，暗河型洞穴往往距离风化壳有一定距离(塔河四区为 60 m 左右)，而内部离散洞穴可发育于各个深

度段。

如T403井, 钻至5488 m时, 发生钻井液漏失, 5488~5554 m段取心明显见到大量砂泥沉积和垮塌角砾的互层, 砂泥沉积段对应自然伽马明显高值(图2a), 而从过该井的波阻抗剖面来看, 洞穴横向展布呈连续条带状(图2b), 综合判定其为暗河型洞穴。

3 建模数据准备

建模数据主要包括井数据、地震数据和大型断裂数据。井数据包括上述24口井的单井洞穴储层识别结果(类型及发育层段)以及孔隙度等测井曲线数据。地震数据为深度域反演波阻抗数据。本文“大型断裂”是相对测井或岩心规模的断裂而言, 特指通过地震资料能直观识别的断裂, 即油藏规模的断裂。之所以要准备大型断裂数据, 是因为多数岩溶洞穴在成因上与断裂有关, 先期断裂一定程度上控制岩溶洞穴的发育^[23-24]。大型断裂数据主要通过人工地震解释和蚂蚁体等属性分析^[25]获取, 已有成熟方法, 在此不再赘述。

此外, 还需要网格化的地层模型作为建模载体。针对S48单元, 以奥陶系顶面为地质模型的顶面, 顶面以下240 m为底面, 设计网格大小为平面25 m×25 m, 垂向为1 m, 建立了地层网格数据体, 总网格数约为580万。

4 多元约束建模方法

成因控制是储层地质建模的一贯策略。常用的“等时建模”、“沉积相相控建模”等策略仅适用于沉积型的常规碎屑岩储层。针对“改造型”古岩溶碳酸盐岩储层, 有学者尝试引入地质控制因素的干预, 提出纵向上按“岩溶带”分层建模, 平面上按照“岩溶古地貌”分区建模的建模策略^[14-15], 具有积极的指导意义, 但其内涵还需进一步商榷, 具体做法也需进一步完善。本文提出了大型断裂、岩溶带和地震波阻抗等多元约束的建模方法。

4.1 断裂约束建模

前人按“岩溶古地貌”分区建模的依据是将古地貌视为控制缝洞储集体发育的基本因素, 不同的古地貌单元具有不同的缝洞储集体发育特征^[14-15]。严格来说, 古岩溶作用开始时候的古地貌确实一定程度上控制着岩溶的发育。但是“峰丛、洼地”等岩溶地貌往往是岩溶作用的结果, 是岩溶作用在近地表的物质体

现, 即岩溶地貌是古岩溶作用过程的结果, 其与地下碳酸盐岩地层中储集体的形态、规模和发育程度是否有明确的相关关系还需进一步商榷; 此外, 有学者尝试用地层回拨、古构造恢复等方法重构岩溶古地貌, 但由于古岩溶作用时间长, 地层剥蚀差异程度大, 该研究也局限于盆地规模, 对于油藏规模的岩溶古地貌尚难以获得较为准确的结果。

在大规模岩溶发育的地质背景下, 岩溶储集体发育的控制因素是地质构造, 尤其是断裂构造^[26], 古岩溶洞穴储集体发育往往与大型断裂密切相关^[24, 26]。S48单元识别出的47个各类洞穴中, 38个与大型断裂直接相交, 约占81%; 8个在紧邻断裂100 m范围内, 占17%; 只有1个与大型断裂距离超过100 m, 占2%(图2d)。油气生产实践也证明了这一点, 塔河油田四区有产能的生产井中, 在断裂附近300 m以内的占90%以上。具体来说, 落水洞型洞穴往往发育于断裂相交处、拐弯处或断裂末端, S48单元识别出的19个落水洞型洞穴中, 4个处于大型断裂相交处, 8个处于断裂拐弯处, 5个处于断裂末端(图2d); 暗河型洞穴上部往往与大型断裂或落水洞型洞穴相连, S48单元识别出的6个暗河型洞穴累计长度约10 km, 共有24条大型断裂与之相交, 有12个落水洞型洞穴与暗河上部相连, 即平均约420 m暗河就发育一条大型断裂, 约830 m发育一个落水洞型洞穴(图2d)。

因此, 从成因和可操作角度考虑, “断裂约束建模”比“古地貌分区建模”更有意义。“断裂约束建模”的具体做法分为三步: 第一步, 基于上述洞穴储层的识别成果(图2d), 统计S48单元内所有洞穴离最近断裂的距离(简称最近距离), 得到洞穴发育随最近距离变化的概率密度曲线(图3), 即最近距离与洞穴发育的概率关系。第二步, 基于大型断裂空间分布, 计算每一个地层网格的最近距离, 得到基于三维网格的最近距离数据体。第三步, 依据第一步中得到的概率关系将第二步中得到最近距离数据体换算为溶洞发育概率数据体, 称为“断裂约束溶洞发育概率数据体”在接下来的模拟中将此概率作为建模的约束参数之一。

4.2 岩溶带约束建模

现代岩溶理论依据地表水和地下水的运动方式在垂向上划分岩溶带, 岩溶带一定程度上控制着洞穴的类型。基于此, 提出了“岩溶带”分层建模方法^[14-15], 具体做法是首先在单井上划分岩溶带, 将岩溶带视为某种“层”进行井间对比, 将地层按照岩溶带分层, 如将不整合面以下约0~60 m视为垂直渗流岩溶带,

60~140 m 视为水平潜流岩溶带；然后在不同的带内分别模拟不同洞穴的分布。然而，岩溶带的界面是由地下水位决定的，而在漫长的地质历史时期，地下水位频繁波动，在油田覆盖区由于地下资料的不完备性，岩溶带划分主观性大；另外，岩溶带不同于地层单元，井间对比也缺乏严谨的理论依据。

本文对这一方法进行了改进，并不对地层进行严格的岩溶带划分，而是针对 S48 单元内已经证实的洞穴，统计其离奥陶系顶部不整合面的距离（即岩溶发育深度），得到不同类型洞穴储层随岩溶发育深度的概率密度曲线（图 4），据此可将地层网格的垂向深度数据换算出不同类型洞穴储层的发育概率，称为“岩溶带约束溶洞发育概率数据体”，将此概率作为建模的约束参数之一。

4.3 地震波阻抗约束建模

井震数据整合是现代油藏地质建模研究的重要手段^[27]。由于储层分布的不均匀性，塔河油田开发井网亦不规则，且井距较大，大多在 400~1000 m。因此，充分整合利用三维地震资料，以降低建模井间预测的不确定性，弥补井数据的不足，就尤为重要。

塔河油田奥陶系油藏埋深超过 5000 m，其地震资料品质并不高。目前，对洞穴响应较为敏感的是波阻抗反演数据。碳酸盐岩本身致密坚硬，呈高速度、高密度即高波阻抗特征，当内部发育缝洞时，就会引起速度、密度的降低即波阻抗的降低^[28]。以塔河油田四区为例，统计 56 口井上识别的 81 个溶洞所对应的波阻抗数据，约 87% 的洞穴对应的绝对波阻抗值在 $1.0 \times 10^7 \sim 1.6 \times 10^7 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ 。但波阻抗反演数据并不能作为反映洞穴的确定性信息，这是因为波阻抗反演数据具有地震信息固有的多解性，其对地下情况的解释不是唯一的^[28]，即洞穴与相应波阻抗信息并不是一一对应的，具有类似的波阻抗信息特征并不都是洞穴。

因此，分析不同类型洞穴发育与波阻抗信息间的相关关系，将波阻抗数据体转化为不同类型洞穴单元发育概率数据体。具体做法是读取 S48 单元内所有洞穴型储层对应的波阻抗数据，统计得到不同类型洞穴储层随波阻抗值变化的发育概率曲线（图 5），据此将地震波阻抗数据体转化为不同类型洞穴储层的发育概率数据体，称为“波阻抗约束溶洞发育概率数据体”，在模拟中将此概率作为建模的约束参数之一。

4.4 多元约束条件整合算法

断裂约束、岩溶带约束和波阻抗约束都是通过各

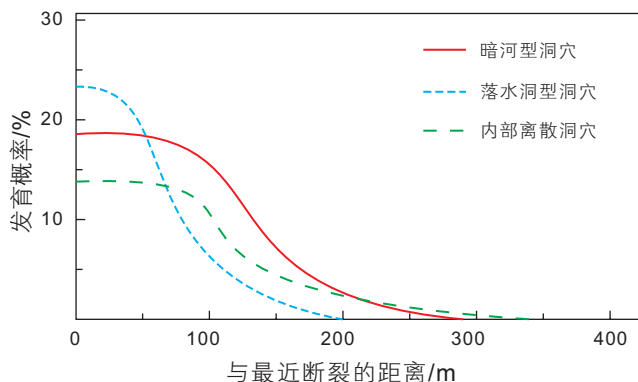


图 3 洞穴储层发育概率与最近断裂距离关系曲线

Fig. 3 Developmental probability curve of cavernous reservoir with the distance to the closest fault

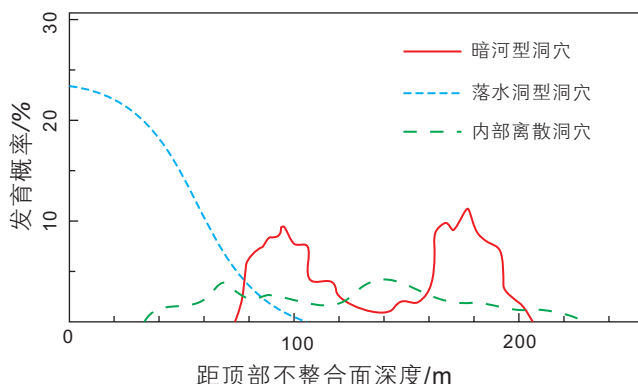


图 4 洞穴储层发育概率与距顶不整合面深度关系曲线

Fig. 4 Developmental probability curve of cavernous reservoir with the distance to the top unconformity

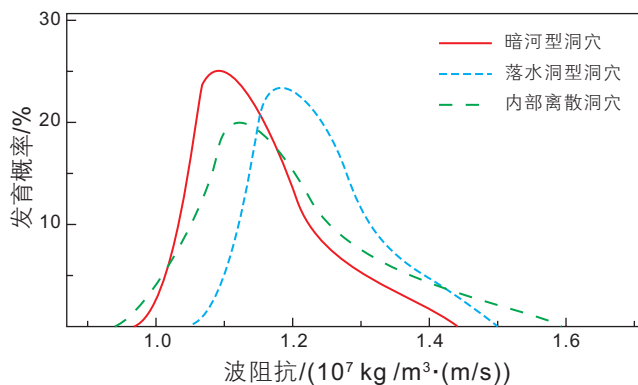


图 5 洞穴储层概率与波阻抗关系曲线

Fig. 5 Developmental probability curve of cavernous reservoir with the P-impedance

自的概率体数据来实现的，在建模中需将其进一步整合到建模算法中。

目前，用于建立储层离散变量（如沉积相类型）三维模型的随机模拟算法主要有序贯指示模拟、多点地质统计学方法和基于目标的建模方法等等。基于目标

的建模方法要求待模拟储层属性具有明确量化的几何学特征,如河道长、宽、高以及形状方向等等;多点地质统计学方法是新兴的模拟算法,但其要求得到与待模拟目标地质体在空间展布上吻合程度高的训练图像。但目前对于地下碳酸盐岩岩溶储层的先验认识还远远不足以得到准确的几何形态参数或训练图像,导致基于目标的建模方法和多点地质统计学模拟方法较难适用。

序贯指示模拟算法可用于模拟复杂各向异性的地质现象,对先验认识的要求相对宽松,并可以通过带有趋势的克里金或同位协同指示克里金等模拟算法整合次级约束数据。因此,本次建模采用带有趋势的序贯指示克里金模拟算法。该模拟方法的关键是条件累积概率分布函数(ccdf)^[30]。对于三维空间的每一网格节点,条件累积概率分布函数(ccdf)取决于该节点处各类型的条件概率 $P(u,k)$ 。该概率满足:

$$\sum_{k=1}^K P(u,k) = 1, \forall u \quad (1)$$

式中, $P(u,k)$ 为变量 k (洞穴类型变量)在位置点 u 的概率,即在位置点 u ,所有变量类型的概率之和为1。

在整个方法体系中,带有趋势的序贯指示克里金模拟算法已经非常成熟且广泛使用,其核心在于如何将前文所述的“波阻抗概率数据体”、“断裂约束概率数据体”和“岩溶带约束概率数据体”3个次级约束数据整合为单一数据体进而作为序贯指示克里金模拟算

法的趋势约束。本文采用基于最优估计的数据融合理论^[31]将这3个不同来源的条件概率数据体融合为一个最优化的概率数据体,以实现这三个因素的共同约束。

$$P(u,k) = F\left(P(u,k)_{\text{波阻抗}}, P(u,k)_{\text{断裂}}, P(u,k)_{\text{岩溶带}}\right) \quad (2)$$

式中, $P(u,k)$ 为变量 k 在位置点 u 的概率; $P(u,k)_{\text{波阻抗}}$ 为波阻抗概率数据体中,变量 k 在位置点 u 的概率; $P(u,k)_{\text{断裂}}$ 为断裂约束概率数据体中,变量 k 在位置点 u 的概率; $P(u,k)_{\text{岩溶带}}$ 为岩溶带约束概率数据体中,变量 k 在位置点 u 的概率; F 为最优估计的数据融合算法。

5 建模结果及验证

通过上述建模数据及方法,建立了塔河油田四区S48单元洞穴储层分布模型(图6),并在此模型的控制下,采用传统方法,将单井孔隙度数据作为条件数据,地震反演波阻抗数据作为约束数据,采用序贯高斯模拟算法,模拟了不同类型洞穴储集体内部的孔隙度参数分布,建立了储层孔隙度三维模型。

基于S48单元孔隙度三维模型,结合生产动态揭示的油水界面信息,计算该单元的地质储量为 $1386 \times 10^4 \text{t}$,将该单元石油地质储量丰度平面图与单井累计产油量对比发现,产能高的区域石油地质储量丰度也高(图7),间接证实建立的洞穴储层三维分布

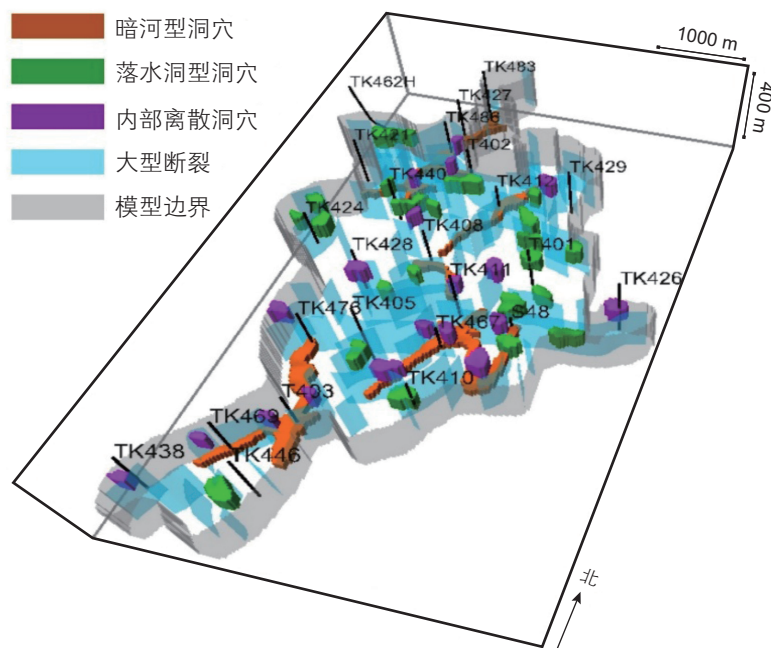


图6 S48单元奥陶系洞穴型储层三维分布模型

Fig. 6 3D model of cavernous reservoirs of Ordovician in S48 unit

- [3] 焦方正, 翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田—塔河油田勘探研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008. [JIAO F Z, ZHAI X X. Giant oil field of marine carbonate origin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.]
- [4] WALKDEN G M. Palaeokarstic surfaces in upper Visean (Carboniferous) limestones of the Derbyshire Block, England [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974, 44(4): 1232–1247.
- [5] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. *AAPG bulletin* 1999, 83: 1795–1834.
- [6] ZHANG K, WANG D R, BRYAN G H. Reservoir characterization of the Ordovician oil and gas pools in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, Northwest China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(1): 123–126.
- [7] LOUCKS R G, MESCHER P K, MCMECHAN G A. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas [J]. *AAPG bulletin*, 2004, 88(5): 545–564.
- [8] SMOSNA R, BRUNER K R, RILEY R A. Paleokarst and reservoir porosity in the Ordovician Beekmantown dolomite of the central Appalachian basin [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2005, 20(1): 50–63.
- [9] 张抗. 塔河油田的发现及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 24–28. [ZHANG K. The discovery of Tahe Oilfield and its geologic implication[J]. *Oil and Gas Geology*, 1999, 20(2): 24–28.]
- [10] 王根久, 王桂宏, 余国义, 等. 塔河碳酸盐岩油藏地质模型[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 109–111. [WANG G J, WANG G H, YU G Y, et al. Geological model of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 109–111.]
- [11] 赵敏, 康志宏, 刘洁. 缝洞型碳酸盐岩储集层建模与应用[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(3): 318–320. [ZHAO M, KANG Z H, LIU J. Modeling and application of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(3): 318–320.]
- [12] 杨辉廷, 江同文, 颜其彬, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层三维地质建模方法初探[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004, 23(4): 11–12. [YANG H T, JIANG T W, YAN Q B, et al. Establishment of 3D geological models of fracture-cave carbonate reservoir[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(4): 11–12.]
- [13] 张淑品, 陈福利, 金勇. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 175–180. [ZHANG S P, CHEN F L, JIN Y. 3D modeling of Ordovician fractured-vug carbonate reservoir, Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 175–180.]
- [14] 赵彬, 侯加根, 刘钰铭. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储层三维地质建模与应用[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(5): 12–16. [ZHAO B, HOU J G, LIU Y M. Three dimensional modeling and application of Ordovician carbonate cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(5): 12–16.]
- [15] 刘钰铭, 侯加根, 胡向阳, 等. 塔河油田古岩溶储集体三维建模[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(2): 34–38. [LIU Y M, HOU J G, HU X Y, et al. 3D modeling of paleokarst reservoir in Tahe Oilfield[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(2): 34–38.]
- [16] LIU Y M, HOU J G, LI Y Q, et al. Characterization of architectural elements of Ordovician fractured-cavernous carbonate reservoirs, Tahe Oilfield, China[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2018, 91(3): 315–322.
- [17] 侯加根, 马晓强, 刘钰铭, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层多类多尺度建模方法研究—以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 59–66. [HOU J G, MA X Q, LIU Y M, et al. A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 59–66.]
- [18] 侯加根, 马晓强, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩溶洞型储集体地质建模的几个关键问题[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(01): 64–69. [HOU J G, MA X Q, HU X Y, et al. Key issues of 3D geological modeling of paleokarst-cave carbonate reservoir[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(01): 64–69.]
- [19] 马晓强, 侯加根, 胡向阳, 等. 论古岩溶洞穴型储层三维地质建模—以塔河油田四区奥陶系储层为例[J]. *地质论评*, 2013, 59(02): 315–324. [MA X Q, HOU J G, HU X Y, et al. Discussion on 3D geological modeling of palaeokarst cave reservoir: A case study on ordovician reservoir of the 4th block in the Tahe Oilfield[J]. *Geological Review*, 2013, 59(02): 315–324.]
- [20] 金强, 田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 15–21. [JIN Q, TIAN F. Investigation of fracture-cave constructions of karsted carbonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2013, 37(5): 15–21.]
- [21] 胡向阳, 权莲顺, 齐得山, 等. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏溶洞充填特征[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(01): 18–21. [HU X Y, QUAN L S, QI D S, et al. Features of of cavern filling in fractured/vuggy carbonate oil reservoirs, Tahe Oilfield[J]. *Special oil and gas reservoirs*, 2014, 21(01): 18–21.]
- [22] 田飞, 金强, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(06): 900–908. [TIAN F, JIN Q, LI Y, et al. Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fractured-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe oilfield[J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(06): 900–908.]
- [23] 顾家裕. 塔里木盆地轮南地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶储层特征及形成模式[J]. *古地理学报*, 1999, 1(1): 54–60. [GU J Y. Char-

- acteristics of and evolution model of karst reservoirs of lower Ordovician carbonate rocks in Lunnan area of Tarim Basin[J]. *Journal of Paleogeology*, 1999, 1(1): 54–60.]
- [24] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2339–2348. [ZHOU W, LI X H, JIN W H, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoir in Tahe area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2339–2348.]
- [25] 张欣. 蚂蚁追踪在断层自动解释中的应用——以平湖油田放鹤亭构造为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(02): 278–281. [ZHANG X. Application of ant tracing algorithm in fault auto-matic interpretation: A case study on Fangheting structure in Pinghu Oilfield[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(02): 278–281.]
- [26] 谭周地. 构造对岩溶的控制意义[J]. *长春地质学院学报*, 1978, 8(2): 43–47. [TAN Z D. Controlling effect of structure on karst[J]. *Journal of Jilin University*, 1978, 8(2): 43–47.]
- [27] 印兴耀, 刘永社. 储层建模中地质统计学整合地震数据的方法及研究进展[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(4): 423–430. [YIN X Y, LIU Y S. Methods and development of integrating seismic data in reservoir model-building[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(4): 423–430.]
- [28] 温志新, 王红漫, 漆立新, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层预测研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 94–100. [WEN Z X, WANG H M, QI L X, et al. Research on the prediction of Ordovician carbonatite reservoir of fissure-cave type in the Tahe oilfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 94–100.]
- [29] 黄捍东, 张如伟, 赵迪, 等. 塔河奥陶系碳酸盐岩缝洞预测[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(2): 213–218. [HUANG H D, ZHANG R W, ZHAO D, et al. Prediction of Ordovician carbonate fracture and cavern in Tahe area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(2): 213–218.]
- [30] 吴胜和, 李宇鹏. 储层地质建模的现状与展望[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3): 53–60. WU S H, LI Y P. Reservoir modeling: Current situation and developmental prospect[J]. *Maine Oil and Gas Geology*, 2007, 12(3): 53–60.]
- [31] 王炯琦, 周海银, 吴翊. 基于最优估计的数据融合理论[J]. *应用数学*, 2007, 20(02): 392–399. [WANG J Q, ZHOU H Y, WU Y. The theory of data fusion based on state optimal estimation[J]. *Methemeica Applicata*, 2007, 20(02): 392–399.]

A multi-constrained modeling method for paleokarst carbonate reservoirs: An application to the Ordovician reservoir in the Tahe Oilfield

LIU Yuming¹, HOU Jiagen¹, LI Yongqiang^{1,2}, MA Xiaoqiang¹, DONG Yue¹, SONG Suihong¹

¹ College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

² Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China

Abstract Unlike conventional clastic rock reservoirs, paleokarst cavernous carbonate reservoirs are special in origin and distribution, which causes the inapplicability of isochronal modeling and facies-controlled modeling. Taking the Ordovician reservoir in the Tahe Oilfield, Tarim Basin as an example, based on identification of cave reservoir types, an original 3D modeling method combining the constraint of faults, karst zones, and seismic impedance was proposed, and a 3D karst reservoir distribution model was built. A Gaussian Kriging simulation method was used and the three kinds of constraint were integrated by the data fusion principle. The results compare well with the cumulative production data.

Keywords paleokarst cavernous reservoir; reservoir modeling; Tahe Oilfield; multi-constraint

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.013

(编辑 付娟娟)