

# 缝洞型碳酸盐岩储层地质建模研究进展

王琦<sup>1</sup>, 张银涛<sup>2</sup>, 张晶<sup>1</sup>, 姚超<sup>2</sup>, 张琪<sup>1</sup>

1 中国石油勘探开发研究院油田开发研究所; 2 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院

**摘要** 缝洞型碳酸盐岩储层空间分布复杂、非均质性强,建立准确可靠的三维地质模型,是该类油藏高效开发的基础和前提。总结了缝洞型碳酸盐岩储层建模技术的发展历程,可分为3个阶段:第1阶段提出了“分区分带”和“岩溶相控”等储集体建模方法,以基于变差函数的两点统计学为主要模拟算法;第2阶段提出了溶洞内部结构建模方法,划分了溶洞类型,总结出不同类型溶洞组合方式,通过成因约束构建不同的岩溶相控模式,建模算法以基于目标与多点地质统计学为主;第3阶段进一步细化储集体成因,针对地下暗河等特定成因的溶洞储集体,通过野外露头与溶洞数据构建训练图像,将先验地质成因模式和后验地震响应相整合,构建综合约束概率体,建立的模型更加精细,能表征出暗河储集体的内部结构要素。对未来缝洞型碳酸盐岩储层地质建模的技术发展进行展望,指出断控岩溶储层建模方法亟需进一步研究,基于深度学习的人工智能地质建模方法是未来的主攻方向。

**关键词** 碳酸盐岩; 缝洞型储层; 地质建模; 概率融合; 塔河油田

中图分类号:TE122.2 文献标识码:A

引用:王琦,张银涛,张晶,等.缝洞型碳酸盐岩储层地质建模研究进展[J].海相油气地质,2024,29(1):99-112.

WANG Qi, ZHANG Yintao, ZHANG Jing, et al. Advance in geological modeling methods of fracture-cavity carbonate reservoirs [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(1): 99-112.

## 0 前言

储层建模是储层地质学和油藏描述中的重要环节。针对常规碎屑岩储层,已有“等时建模、相控建模”等成熟的建模原则及相应的技术方法<sup>[1]</sup>。而碳酸盐岩缝洞型油藏是由岩溶作用与构造断裂等后期改造作用叠加而形成的以孔、洞、缝为主要储集空间的油藏<sup>[2]</sup>,其储集体的发育不受沉积等时界面的约束<sup>[3]</sup>,且储层空间展布具有极强的复杂性和随机性,因此,传统的碎屑岩储层建模技术不适用于缝洞型碳酸盐岩油藏<sup>[4]</sup>。针对缝洞型碳酸盐岩储层,前人提出了岩溶相控<sup>[5]</sup>、多类多尺度建模<sup>[6]</sup>、成因约束<sup>[7]</sup>等多种建模方法,近年来更是将人工智能与地质建模技术结合,取得了很好的进展<sup>[8-11]</sup>。本文回顾了20余年来缝洞型碳酸盐岩储层建模技术的发展历程,归纳总结不同阶段缝洞型储层地质建模方法上的研究进展,展望未来的发展趋势,以期缝洞型碳酸盐岩储层建模提供参考。

## 1 缝洞型储集体建模技术发展历程

缝洞型碳酸盐岩储层建模技术发展可分为3个阶段。

第1阶段介于本世纪初至“十一五”期间。“十一五”之前,人们单纯使用井点数据直接插值建立储层属性模型<sup>[12]</sup>,由于缺乏地质模型的约束,建模结果难以表达缝洞型储层极强的非均质性。后来,有学者考虑到该类储层的特殊成因,尝试开始按不同储集体成因类型对储集体进行分类建模,提出了“分类型建模”、“纵向上岩溶相分带建模”方法<sup>[5]</sup>,也尝试在建模中使用动态资料约束<sup>[13]</sup>、地震属性约束<sup>[14]</sup>。这些尝试与单纯的插值建模相比有了很大的进步,但仍存在一些不足,如相控模型较粗糙、地震信息整合单一,不能很好体现出溶洞、溶蚀孔洞及裂缝尺度的差异性。“十一五”期间,侯加根教授团队<sup>[3,6]</sup>系统地提出了基于多类多尺度数据整合的缝洞系统分布建模方法体系,基于多类多尺度数据的整合分别建立各类型储集体离散分布模型。刘

收稿日期:2023-07-11; 改回日期:2024-01-16

本文受国家自然科学基金面上项目“超深断溶体油藏油-气-水三相流体流动机理及数值模拟方法研究”(编号:52074344)资助

**第一作者:**王琦,博士,高级工程师,主要从事深层超深层碳酸盐岩油藏开发研究工作,获得省部级科技进步奖2项。通信地址:100083 北京市海淀区学院路20号 中国石油勘探开发研究院; E-mail:wangqi.riped@petrochina.com.cn

钰铭等<sup>[15-16]</sup>依据大型溶洞发育的区带特征提出了“垂向划带、平面分区”的溶洞建模方法,加强了古岩溶储集体发育模式在建模中的约束作用。赵彬等<sup>[17]</sup>将波阻抗数据与溶洞发育概率建立相关关系约束井间溶洞发育,使用带趋势的序贯指示模拟建模方法进行溶

洞建模,在算法上实现了优化。胡向阳等<sup>[18]</sup>基于岩溶相控的建模原则,通过构建溶洞发育概率体与井间裂缝发育概率体,使用多属性协同模拟方法建立了溶蚀孔洞模型和离散裂缝模型。该阶段建立的三维模型能较好地揭示缝洞储集体的三维分布(表1)。

表1 缝洞型碳酸盐岩建模历程  
Table 1 Phases of fracture-cavity carbonate reservoir modeling research

发展阶段	建模方法	建模对象	约束条件	建模内容	
第1阶段	序贯指示模拟	缝洞系统	平面分区 垂向分带	将缝洞型储层分为溶洞、溶蚀孔洞与裂缝,基于多类多尺度数据的整合分别建立各类型储集体离散分布模型 <sup>[6]</sup> ,建立的模型能体现出缝洞储集体的分布	
第2阶段	多点统计学 基于目标	大型溶洞	管道型	形态规模	针对缝洞型储层中溶洞的内部结构进行进一步研究,通过成因约束构建不同的岩溶相控模式 <sup>[7]</sup> ,建立的模型能体现溶洞的形态、规模
			竖井型	组合关系	
			孤立型	成因约束	
第3阶段	多点统计学 基于目标	断控岩溶	断层核	露头形态 成因约束 地震响应	针对具有特定形态和成因的地下暗河溶洞储集体进行建模研究,通过露头构建训练图像 <sup>[19]</sup> ,加强建模约束条件,优选整合方法构建发育概率体 <sup>[20]</sup> 。建立的模型更加精细,能体现出暗河内部结构要素
			裂缝破碎带		
			基岩		
	卷积神经网络	地下暗河	厅堂洞		
			落水洞		
		多层管道			

第2阶段始于“十二五”期间。随着油田开发进入中后期,溶洞尤其是大型溶洞作为油田产量的主要贡献者,仅刻画其缝洞三维分布轮廓已经不足以满足开发需求,因此建模对象由缝洞系统三维轮廓描述深入到对溶洞储集体内部结构的刻画。李永强等<sup>[7,21]</sup>根据形态规模特征,将溶洞细分为管道型、竖井型和孤立型溶洞,通过岩溶模式修正建立不同类型的大型溶洞模型。刘钰铭等<sup>[22]</sup>通过基于最优估计的数据融合理论将断裂、岩溶带和波阻抗约束数据充分整合作为模拟的趋势约束数据。该阶段建立的三维模型能体现出溶洞内部的结构。

第3阶段始于“十三五”期间。随着缝洞型碳酸盐岩储层分布规律<sup>[23-26]</sup>、成因类型<sup>[27-32]</sup>、内部结构<sup>[33-37]</sup>等研究的不断深入,储集体成因认识由潜山区向内幕区突破,学者们进一步细分了溶洞储集体的成因类型,对地下暗河、断控岩溶等特定类型的溶洞储集体进行建模研究。蒋超<sup>[19]</sup>将湖南张家界现代岩溶露头的溶洞平面形态数字化,建立了地下暗河储集体训练图像,通过多点地质统计学构建地下暗河模型。谢鹏飞等<sup>[20]</sup>以井震结合的方式进行确定性建模,基于露头所展示的地下河特征,对模

型进行人机交互修正得到地下暗河模型。张文彪等<sup>[38]</sup>基于断控岩溶内部结构的核带特征差异,按照“层级建模”的方法,以地震结构张量属性为基础,确定性建立断控岩溶三维分布模型。该阶段建立的模型能体现出地下暗河等特定类型溶洞的内部结构要素(表1)。下文按照上述3个阶段详细阐述缝洞型碳酸盐岩储层建模方法、约束条件及建模内容上的研究进展。

## 2 缝洞系统分布建模

碳酸盐岩缝洞型油藏具有埋藏深、厚度大、储层分布复杂、非均质性强等特点。依据储集空间的几何形态、大小和成因可将缝洞系统划分为基质孔隙、裂缝、溶蚀孔洞和溶洞等4大类<sup>[39-40]</sup>。基质孔隙通常不具备储渗能力;裂缝的主要作用在于提供流动通道,按尺度与分辨率可分为2类,即地震资料上能够直接识别出的大尺度断裂与通过常规测井、成像测井等资料识别,并在地震资料上也能呈现出一定响应的小尺度裂缝;溶蚀孔洞是指孔洞直径介于2~500 mm的储集体,岩心、常规测井和成像测井上均可以准确识别;溶洞非均质性极强,规模尺度范

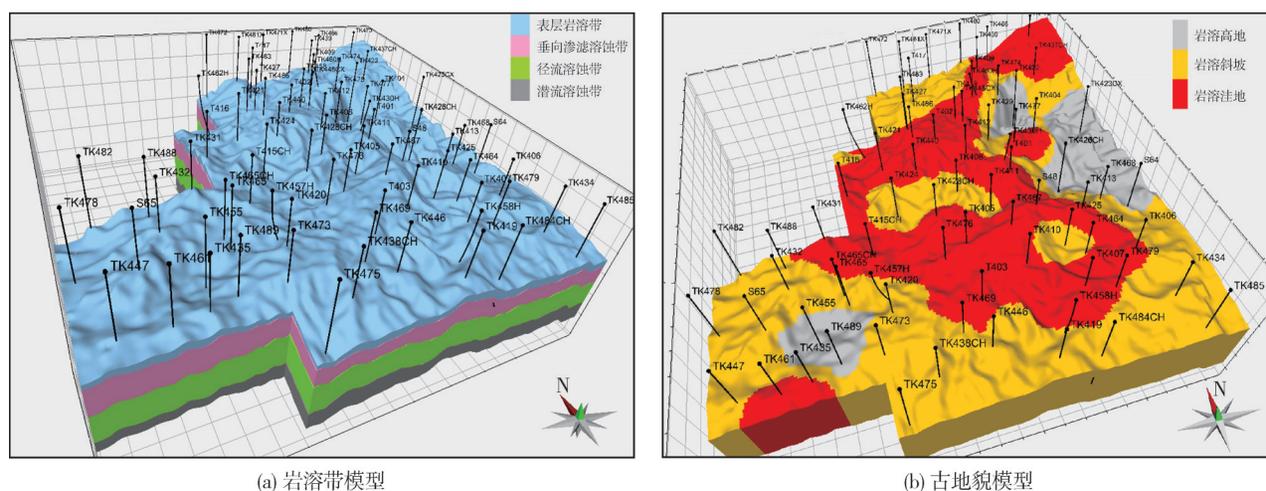
围主要为0.5~70 m。油田的生产实践表明,近95%的产量来自于溶洞型储层,因此溶洞是最重要的储集空间。基于上述缝洞系统分类,不同类型储集体成因、形态、空间分布及发育规模、内部流体流动机理均差异明显,彼此之间缺乏层次性。因此,对于碳酸盐岩缝洞型储层,需要进行多类多尺度地建模<sup>[6]</sup>,以客观反映缝洞系统的分布,即分别研究溶洞、溶蚀孔洞与裂缝的建模方法。

## 2.1 溶洞离散分布建模

根据现代岩溶研究<sup>[41-42]</sup>,大型溶洞储集体的发育受到岩溶古地貌和古水系的控制,其空间分布趋势与不同岩溶古地貌,以及古水系的发育规模、方向等因素具有一定的成因关系。垂向上,溶洞在不同岩溶带中具有明显的差异性;平面上,溶洞在不同地貌单元上也有明显的分区特征。

针对溶洞储集体的区带特征,依据钻录井、岩

心和成像测井等资料,在每口单井中划分出不同的岩溶带,通过数据插值建立不同岩溶带层面,实现“垂向分带”(图1a)。平面上需要通过古地貌恢复得到地貌单元特征。有学者指出塔里木盆地塔河油田海西早期岩溶古地貌的起伏可以通过奥陶系顶面至区域性标志层——下石炭统双峰灰岩顶的厚度近似地反映出来<sup>[43]</sup>,因此以双峰灰岩(T56)作为基准面,采用层拉平技术进行古地貌恢复,以划分不同古地貌单元,进而实现“平面分区”(图1b)。以钻井、测井和地震等资料识别出的大型溶洞作为建模确定性数据,优选能体现溶洞发育的地震属性(如波阻抗反演体、相干体等)作为建模时井间约束的软数据,采用相控约束在不同的岩溶带、古地貌单元内模拟溶洞储集体的三维分布<sup>[17]</sup>,应用带趋势的序贯指示模拟算法,得到大型溶洞储集体的三维模型(图2)<sup>[4,15]</sup>。建立的模型能反映出溶洞储集体的分布特征。

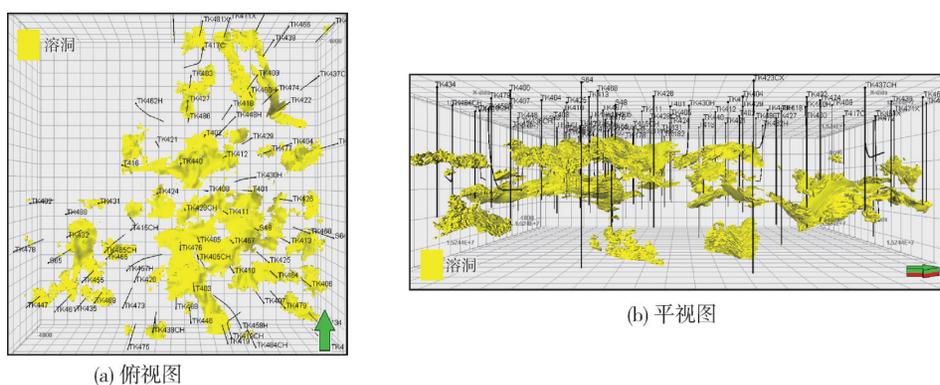


(a) 岩溶带模型

(b) 古地貌模型

图1 塔河油田四区奥陶系分区分带模型(引自文献[4,16])

Fig. 1 Ordovician zoning models of fourth block in Tahe Oilfield (cited from reference [4, 16])



(a) 俯视图

(b) 平视图

图2 塔河油田四区大型溶洞储集体离散分布模型(引自文献[4])

Fig. 2 Discrete distribution model of large cave reservoir of fourth block in Tahe Oilfield (cited from reference [4])

## 2.2 溶蚀孔洞随机分布建模

溶蚀孔洞是孔洞直径在2~500 mm之间的孔隙空间,其在三维空间中的分布十分复杂。井孔中的溶蚀孔洞发育段可以通过取心井的岩心观察、成像测井图像直观解释,也可以通过常规测井资料解释和生产动态资料分析获得,但井间溶蚀孔洞的发育规模、空间分布的确切位置则无法通过现有资料直接获取,因此,在溶蚀孔洞储集体建模中,通常采用随机模拟的方法获得溶蚀孔洞储集体的三维空间分布。

在大型溶洞发育程度高的部位,溶蚀孔洞发育十分密集,二者空间分布呈正相关关系,因此,针对溶蚀孔洞的建模可采用大型溶洞储集体分布作为“相控”约束条件,以井孔解释成果作为溶蚀孔洞硬数据,基于序贯指示模拟算法得到溶蚀孔洞的随机分布模型<sup>[4,18]</sup>。

## 2.3 多尺度裂缝离散分布建模

裂缝是缝洞型碳酸盐岩储层重要的渗流通道。与等效连续性模型相比,DFN模型明确定义了模拟区内每一条裂缝的位置、产状、形态等参数,为获得精确的裂缝几何模型与参数模型提供了可能。基于岩心、测井、地震等资料,根据裂缝规模、裂缝识别方法的尺度界限性,以及裂缝发育的主控因素,将裂缝分为大尺度裂缝与小尺度裂缝,在此基础上采用分级建模的思路建立多尺度裂缝离散网络模型和裂缝等效物性参数模型。

大尺度裂缝包括人工地震解释的断层,因较多地考虑了断层发育规律,可靠性较强,故大尺度裂缝模型采用确定性建模的方式建立。中尺度裂缝指通过蚂蚁体追踪等方法识别出的裂缝。从蚂蚁属性体中分组系自动拾取断裂信息,断裂信息精度更高,通过地震解释、人机交互的方式进行补充和修正,建立中尺度裂缝离散分布模型。

小尺度裂缝是储层裂缝网络的主体部分,但井间的小尺度裂缝分布信息难以直接通过地震资料获取,无法利用确定性建模或两点统计插值的方法建立小尺度裂缝离散分布模型。因此采用模拟退火的随机模拟方法,将裂缝密度分布模型作为退火模拟的目标函数,并确定一个目标函数阈值,根据小尺度裂缝产状统计数据随机产生小尺度裂缝,并向目标函数进行“逐步逼近”,直至达到目标函数阈

值为止,最终获得小尺度裂缝离散分布模型<sup>[44]</sup>(图3)。模拟出的裂缝能符合研究区裂缝发育密度的同时,产状、倾角等参数也能符合地质认识。

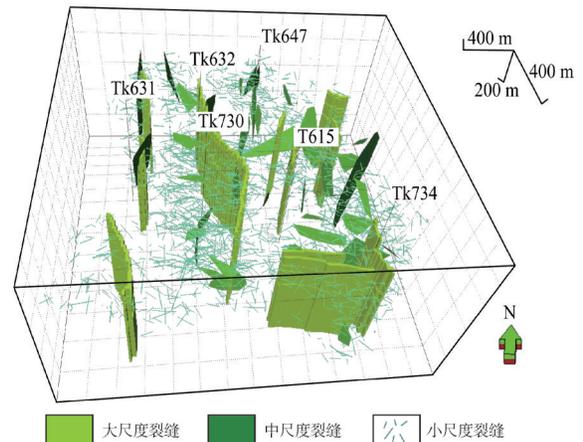


图3 塔河油田T615单元裂缝融合分布模型(引自文献[44])  
Fig. 3 Fracture fusion distribution model of T615 Unit in Tahe Oilfield (cited from reference [44])

## 3 溶洞内部结构建模

上述溶洞建模方法均是传统的两点地质统计学方法,基于变差函数对井间进行预测,基本可以实现对溶洞型储集体整体轮廓形态的刻画,但是对溶洞内部的表征不够精细。随着地质认识的进一步深入,学者发现溶洞储集体可能是单个的孤立洞穴,也可能是多个洞穴叠合形成的洞穴联合体,而后的形态和组合方式多样,通常具有更加复杂的内部结构<sup>[3]</sup>,不同溶洞的形态、规模、充填特征也不相同,先前的溶洞建模方法已经不能满足精细三维地质建模的需要,因此需要进一步对溶洞内部的结构进行研究。

### 3.1 溶洞内部结构特征

根据溶洞的形态规模,可将溶洞细分为管道型溶洞(地下河型溶洞)、竖井型溶洞(纵向发育型溶洞)、孤立型溶洞等类型<sup>[21]</sup>(图4a)。管道型溶洞的发育受控于潜水面位置和地质构造条件,在平面上呈管道状延伸且易出现多级次的分支,截面形态有近圆形、椭圆形、钉子形;竖井型溶洞多沿管道在平面上呈散点状分布,平面形态以近圆形为主,纵剖面形态呈飞碟形、钥匙孔形、豆荚形;孤立型溶洞分布较为离散,其平面形态有近圆形和不规则形,纵剖面形态呈似扇形、似矩形等形态(图4a)。

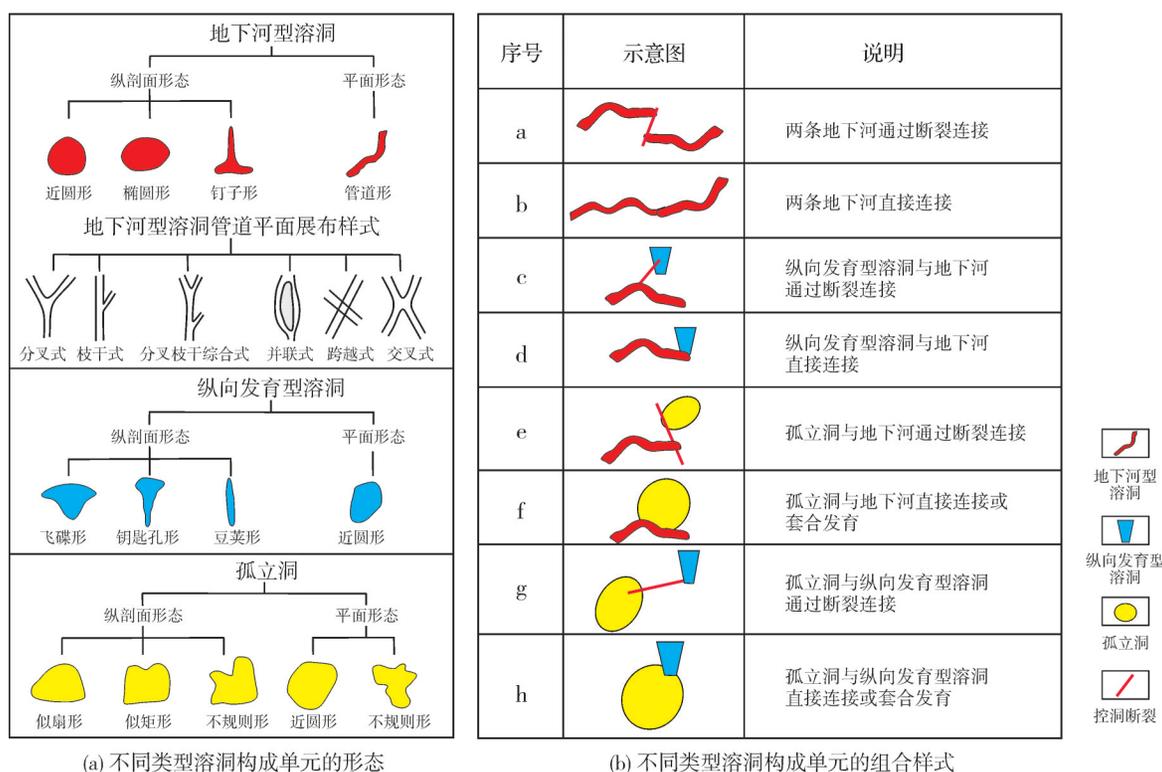


图4 溶洞构成单元形态及组合样式示意图(引自文献[45],有修改)

Fig. 4 Schematic diagram of the morphology and combination style of karst cave units (cited from reference [45], modified)

缝洞系统受构造-岩溶作用所控制,在其内部不同类型溶洞的组合关系非常复杂,断裂可作为连接不同类型溶洞的“桥梁”<sup>[45]</sup>(图4b):

(1)沿单一断裂发育成单支型地下河管道,若构造复杂,受多组断裂控制则会形成树枝型或网络型地下河系统(图4b序号a)。

(2)潜水面位置不是一成不变的,在构造抬升时,地下水基准面下降,会形成多层的地下河,新的地下河可下切直接与前期地下河相接(图4b序号b)。

(3)纵向发育型溶洞主要存在于包气带,发育于地下河上方,在成因上其与控洞断裂连接(图4b序号c)或由断裂演化而来直接与地下河相连(图4b序号d)。

(4)断裂在缝洞系统中起到沟通流体的作用,故3种不同类型的溶洞之间可以通过控洞断裂相互连接(图4b序号e,g)。在溶蚀作用进一步扩大之后断裂演变为溶洞,故不同类型溶洞之间也存在直接连接的现象,或在同位置套合发育(图4b序号f,h)。套合发育的成因是同一位置有不同的岩溶水溶蚀作用同时进行,如沿层面的横向溶蚀和沿高角度裂

缝的垂向溶蚀。

### 3.2 岩溶相控模式约束

针对塔河油田奥陶系油藏的典型缝洞单元组构要素分布特征,前人总结归纳了断裂与潜水面双重控制与潜水面主控的2种溶洞分布建模的相控模式<sup>[4]</sup>。

溶洞的形成具有由裂隙→溶隙→溶道→溶洞的演化过程。据统计,塔河油田研究区大多数的放空漏失现象出现在断裂附近,溶洞发育常具有与断裂一致的走向,在多组断裂的交会部位也容易形成溶洞。现代岩溶研究表明,岩溶作用的强度与古地貌有着密切的关系。每一种古地貌条件下均有其相应的潜水面,潜水面通常受控于构造升降和海平面变化。潜水面与管道型溶洞发育的关系密切,其上下有条件形成大规模的岩溶管道(图5a)。

在岩溶斜坡部位,径流溶蚀带由于经受多期潜水面动荡的影响,可形成多层洞穴。另外,构造抬升致使表层岩溶带和渗滤岩溶带剥蚀殆尽,原本发育在径流带的管道抬升出露地表,呈单支管道或管道网络状展布,发育在表层岩溶带的竖井已经基本

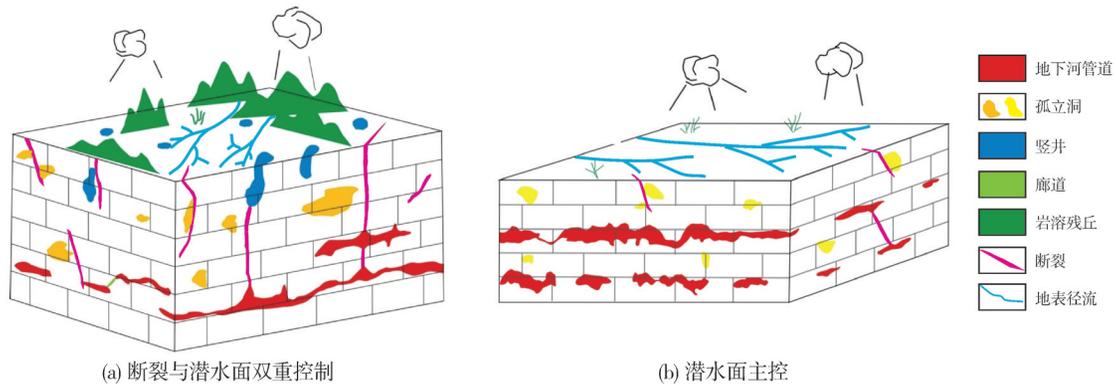


图5 缝洞成因模式(引自文献[45])

Fig. 5 Genetic model of fracture and cave(cited from reference [45])

消失(图5b)。在不同的岩溶模式下,溶洞内部形态与组合方式均有不同,因此需采用不同的建模方法。

### 3.3 算法选择与建模结果

序贯指示等模拟方法难以模拟如管道型溶洞等复杂形态的地质体,因此引入多点地质统计学方法和基于目标的方法,分别用于不同相控模式下溶洞组构要素的三维离散分布建模。相对于两点地质统计学而言,多点地质统计学方法结合了基于目标和基于象元的算法优点<sup>[1]</sup>,在描述具有复杂空间结构与几何形态的地质体方面要优于两点地质统计学方法。

针对断裂与潜水面双控模式,因溶洞储集体的分布受断裂和不整合面的双重控制,管道型、孤立型、竖井型等溶洞均有发育,溶洞储集体形态规模

多样且组合特征复杂,很难用传统地质统计学的方法建立其三维分布模型,故采用多点地质统计学模拟算法进行溶洞模型的建立。应用多点地质统计学建模的关键在于训练图像的建立,训练图像包括目标(如管道)的定量几何形态、目标的发育位置以及目标之间的组合关系信息。根据现代岩溶与缝洞单元描述的成果,并基于专家认识,绘制出岩溶高地背景下溶洞储集体建模的训练图像,以测井资料的溶洞解释成果作为硬数据,以波阻抗等地震属性体作为井间约束的软数据,采用多点地质统计学Snesim算法对溶洞要素进行模拟,建立研究区溶洞的三维分布模型(图6a)。

针对潜水面主控模式,因各组构要素之间的组合特征较简单,故采用基于目标的方法建立其三维分布模型。在单井溶洞类型划分的基础上,以粗化

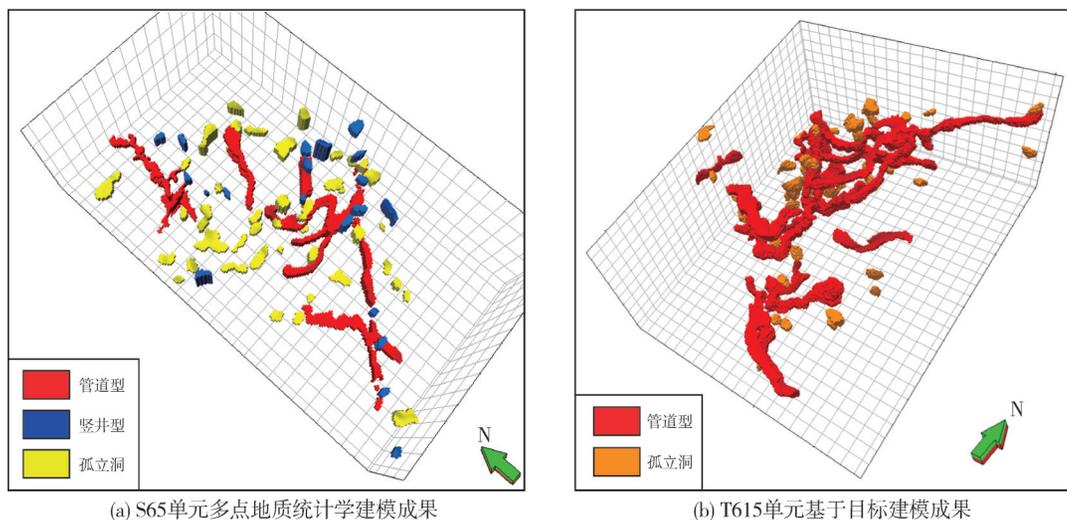


图6 塔河油田适用于不同岩溶模式的建模成果(引自文献[45])

Fig. 6 Modeling results applicable to different karst models of Tahe Oilfield(cited from reference [45])

后的单井溶洞储集体的分布作为建模的硬数据,以统计的不同类型溶洞的形态参数作为先验地质数据,以基岩作为背景相,采用示性点过程模拟的方法,将“洞穴”作为目标体投放于背景相中,从而建立缝洞单元溶洞的三维分布模型(图6b)。

## 4 地下暗河溶洞建模

划分溶洞规模形态,以岩溶相控进行约束的溶洞建模方法在溶洞内部结构表征方面取得了积极进展,但是针对特定类型溶洞的表征不够精细。随着缝洞型岩溶储层的成因认识由潜山区向内幕区突破,学者们发现了地下暗河<sup>[46]</sup>、断控岩溶<sup>[31]</sup>等特定类型溶洞储集体,并在其内部结构表征方面做了大量研究。在地质建模领域,地下暗河溶洞的建模方法相对成熟,学者们在地下暗河溶洞建模方法<sup>[19-20]</sup>、约束条件<sup>[22]</sup>等方面取得了诸多成果。

### 4.1 地下暗河结构特征

地下暗河是大气淡水沿潜水面横向运移形成的特殊溶洞型储层,平面上为分支条带状,可连续或断续;剖面上呈多层或单层分布<sup>[47]</sup>。地下暗河系统包括厅堂洞、落水洞、管道和裂缝溶蚀洞<sup>[48]</sup>。厅堂洞是地下暗河最主要的储集空间类型,主要沿断层或裂缝交会处发育,因此易受地下水溶蚀从而形成较大的纵横向规模,其形态呈房屋状管道,由于径流岩溶带的垮塌作用,常见部分充填或全充填;落水洞是地表水流入地下的进口,形成于潜水面之

上的地下水垂直循环极为流畅的地区;管道是径流岩溶带中地下水的主要通道,其规模小于厅堂洞,受断层或裂缝的走向影响沿着暗河的延伸方向发育;裂缝溶蚀洞沿垂直裂缝发育,是沟通浅层和深层暗河的主要通道。从成因上分析,地下暗河的发育受断裂分布、地下水供给等多重因素控制<sup>[49]</sup>,因此模型约束条件的限制至关重要。地下暗河溶洞建模采用多点地质统计学算法,因此训练图像的构建也是建模的关键。

### 4.2 地下暗河训练图像构建

建立训练图像的方法包括:基于专家地质认识手工绘制地质模型原型,然后将其数字化处理后转换为训练图像;也可以使用基于目标方法建立模型并作为训练图像,亦或是将地震数据属性截断用作训练图像<sup>[7, 48, 50-51]</sup>。由于野外露头相较于地下储层来说更加直观,数据获得的成本更低,因此,学者优选与研究区相似的古岩溶露头及研究区数据,统计暗河形态,测量几何参数(长、宽、高、长宽比、宽高比)及内部特征(充填、物性)来构建训练图像。例如,前人将湖南张家界现代岩溶露头溶洞(图7a)进行平面形态数字化,建立了基于野外露头的地下暗河储集体训练图像<sup>[19]</sup>(图7b),根据研究区露头与古溶洞数据的观测统计,对现代地下河训练图像进行校正<sup>[52]</sup>(图7c),构建基于露头信息的地下暗河训练图像(图7d)。所得训练图像不仅符合暗河发育的地质模式,也能符合研究区溶洞的形态与规模参数。

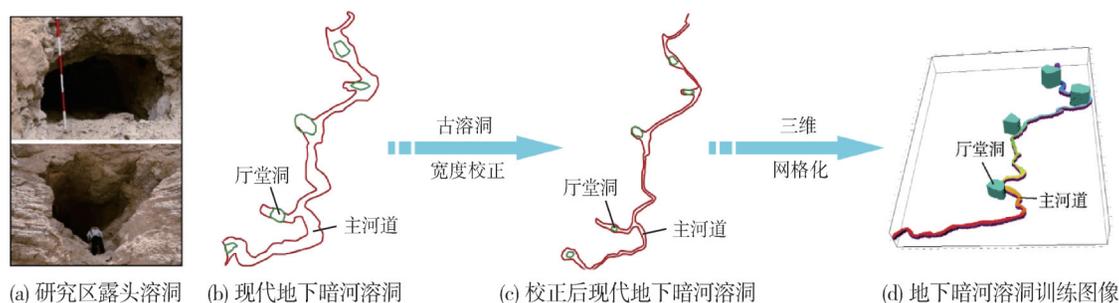


图7 暗河储集体训练图像制作过程(引自文献[50])

Fig. 7 Construction process of training image for underground river reservoir(cited from reference [50])

### 4.3 多尺度约束构建井间发育概率体

地下暗河的发育规律受多种成因控制,而地震数据在建模过程中作为软数据也能对井间起到约束作用。因此,可以将用于约束的信息分为2类:先

验地质成因模式和后验地震响应。先验地质成因模式是控制地下暗河储集体发育的关键因素,而后验地震信息则体现了储集体发育后在地震上的特征响应,也能间接反映储集体的发育概率。

岩溶古水系与断裂是地下暗河发育最主要的

控制因素,以依据单井数据解释的地下暗河作为统计基础,统计水系、断层与地下暗河发育频率的关系(图8),构建成因控制的条件约束概率体(图8)。

小尺度曲率相干体和振幅绝对值属性在预测

地下暗河时能取得很好的响应。以单井解释的地下暗河为基础,将网格所对应的地震属性值与暗河发育的频率进行线性回归,分别得到小尺度曲率相干属性和振幅绝对值与地下暗河发育概率的相关关

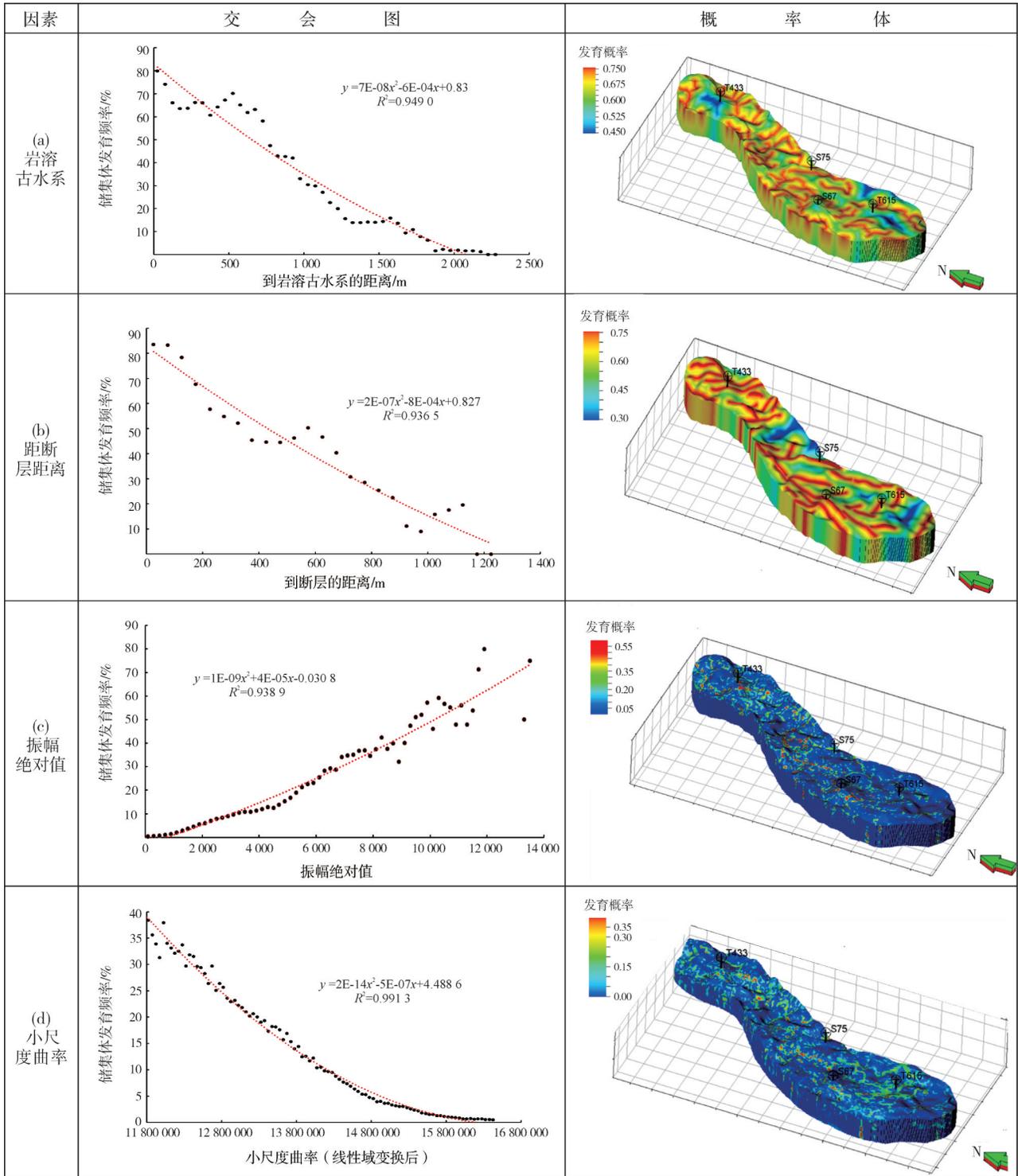


图8 不同条件约束下溶洞储集体概率体的构建(引自文献[4],有修改)

Fig. 8 Construction of probability bodies for cave reservoir under different constrained conditions (cited from reference [4], modified)

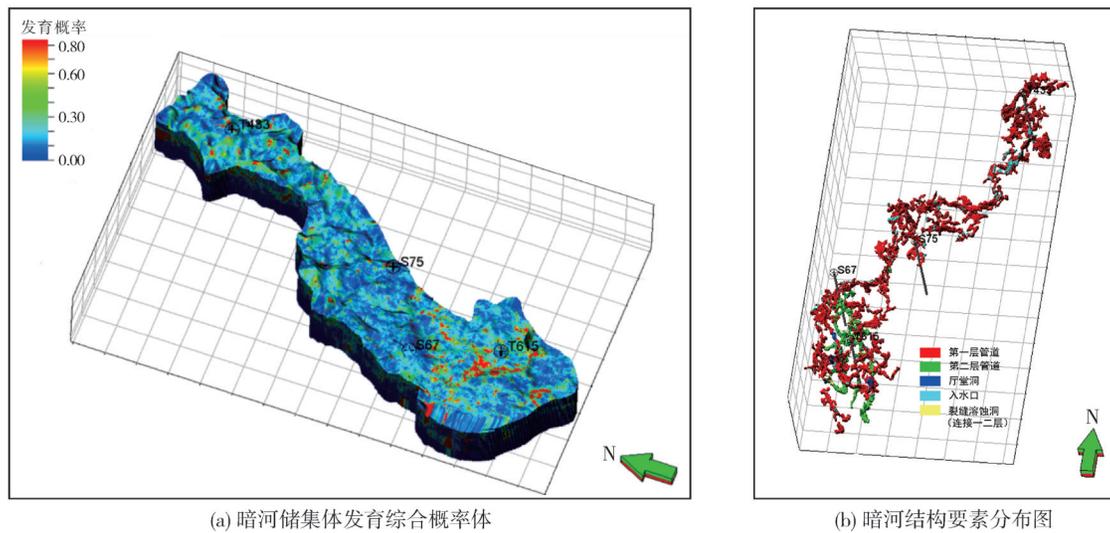
系,根据相关关系对地震属性进行计算,将地震属性值转换为地下暗河储集体的发育概率体(图8)。

从约束条件来源考虑,成因模式从根本上约束地下暗河的发育过程,是地震响应的基础,而地震响应是成因模式的验证和补充,两者相辅相成,且均存在一定的不确定性。受到多点地质统计学算法的限制,只能应用一个概率体约束模拟过程。为了充分发挥地质模式和地震信息的约束作用,需要进行概率融合。概率融合方法选取 Permanence of Ratios(PR)模型,该方法既考虑了不同条件之间的独立性,也能处理信息的冗余<sup>[53]</sup>,其一般性公式如下:

$$P\{R|S_1, \dots, S_n\} = \frac{\left(\frac{P\{R\}}{1-P\{R\}}\right) \cdot \left(\frac{1-P\{R\}}{P\{R\}}\right)^{\sum_{i=1}^n \tau_i}}{\left(\frac{P\{R\}}{1-P\{R\}}\right) \cdot \left(\frac{1-P\{R\}}{P\{R\}}\right)^{n-1} + \prod_{i=1}^n \left(\frac{1-P\{R|S_i\}}{P\{R|S_i\}}\right)^{\tau_i}} \quad (1)$$

式中: $n=4$ , $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 分别代表古水系、断层、小尺度曲率相干属性和振幅平均曲率属性, $P\{R|S_i\}$ 为对应的条件概率, $\tau_i$ 为相比于前面数据的独立贡献度; $P\{R\}$ 为建模区域地下暗河发育的先验概率。 $\tau_i = 1 - \rho(S_1, S_2, \dots, S_i)$ ,其中 $\rho(S_1, S_2, \dots, S_i)$ 为 $S_i$ 与数据 $S_1, S_2, \dots, S_{i-1}$ 的复相关系数,代表了 $S_i$ 对于前面数据的依赖程度。

根据前述方法得到古水系、断层、小尺度曲率相干属性和振幅平均曲率属性共4种因素控制下的发育概率体,通过计算各个因素相对其他因素的相关系数来确定每种因素的独立贡献度 $\tau_i$ ,代入到式(1)中,得到约束条件融合后的综合概率体(图9a)。然后,基于多点地质统计学得到模拟结果,综合暗河溶洞的结构要素,进一步对模拟结果进行人为修正(连续性、多余部分、厚度等特征),使得建立的模型在符合井点的基础上,能够体现出暗河溶洞结构要素(图9b)。



(a) 暗河储集体发育综合概率体

(b) 暗河结构要素分布图

图9 塔河油田地下暗河溶洞建模结果(引自文献[4])

Fig. 9 Modeling results of underground river in Tahe Oilfield (cited from reference [4])

## 5 展望

缝洞型碳酸盐岩储层建模经历了刻画缝洞储集体分布、表征溶洞内部结构、研究特定类型溶洞建模的过程。建模算法由最初的基于变差函数的两点统计学发展到基于目标、多点地质统计学,再发展到通过卷积神经网络的方法。模型的约束条件从最初的井点插值发展到分区分带相控约束,再到成因模式约束溶洞发育特征,最后发展到将先验的地质成因模式和后验的地震响应通过数学

方法整合构建综合约束概率体的方法。本文从建模对象、建模方法与约束条件3个方面对未来的研究重点进行展望。

### 5.1 断控岩溶建模是未来研究的难点和重点

随着塔里木盆地富满、顺北等油田的成功建产,断控岩溶的概念不再局限于潜山区与断层、裂缝相关的孤立洞群,在埋深超8 000 m的超深层,仍能发现由大型走滑断裂带控制的岩溶储集体<sup>[30]</sup>。不同学者针对断控岩溶油气藏的成因类型<sup>[32]</sup>、内部

结构<sup>[30,35,54]</sup>、表征技术<sup>[55]</sup>等内容做了较多的研究工作,揭示了断控岩溶储集体垂向具有“核-带”模式<sup>[30]</sup>,平面具有断裂分段拼贴演化特征<sup>[33]</sup>。目前针对断控岩溶储集体的研究多为基于露头、地震、测井等资料推断的地质模式,少有涉及建模的研究。在断控岩溶建模思路,张文彪等<sup>[38]</sup>基于断控岩溶内部结构上的差异性分类特征提出了“层次建模”的思路,在此基础上,将断溶体系按照形成过程及尺度规模划分为走滑断裂破碎带、断溶体、断溶体内部缝洞带、溶洞充填4个层次,根据断溶体系不同级次规模及分布特点,优选针对性的建模技术<sup>[56]</sup>。该方法将传统的确定性建模与地质统计学建模相结合,在表征断控岩溶内部结构上提出了很好的思路。但是,目前可用于标定的井数据量较少,地质统计学建模的不确定性较大,且约束条件不够。断控岩溶的成因机理复杂<sup>[32]</sup>,现有的约束条件难以实现该类储集体的精准建模<sup>[38,56]</sup>。随着断控岩溶储集体地质认识的不断深入,基于断控岩溶地质认识准确表征其内部结构是下一步建模的重点和难点。

## 5.2 人工智能地质建模方法是未来的重点攻关方向

多点地质统计建模在模拟实现连续性和解决非平稳问题上有待提高,该方法仅通过训练图像小范围内的多点统计信息来表达地质模式,在更大范围地质模式的尺度上缺少特征的完整抽象和总结。当处于密井下井数据较多或要模拟复杂的地质体结构时,通过多点地质统计学方法建模比较困难,模型效果并不理想<sup>[8]</sup>,易出现地下河溶洞不连续、溶洞规模与实际有差距等现象。

随着人工智能技术的推广应用,学者开始将人工智能与地质建模技术进行融合,将生成对抗网络(GANs)的方法引入缝洞型储层建模这一领域,并对该方法进行优化,构建了渐进增长的生成对抗网络地质建模算法。在渐进增长的基础上,设计多条件直接约束的生成对抗网络地质建模算法,应用于塔河地区奥陶系暗河溶洞储集体的地质建模<sup>[9-11]</sup>,在地质模式吻合程度、模型多样性、模拟时间和噪声压制几个方面优于多点地质统计学建模算法。段太忠等<sup>[57]</sup>提出了基于条件化生成对抗网络的断溶体地质建模方法,在深层少井的资料条件下,基于多源数据综合建立了“原位等尺度”训练样本,在训练网络搭建的基础上,建立了顺北油田5号断裂带

南段的断溶体储层三维模型。

目前针对该方法的建模研究正逐渐完善,但仍存在一些问题,如基于GANs的岩溶储层生成器仅应用静态数据(井筒解释数据和概率体数据)约束,未能更多地考虑动态数据所反映的储集体发育规模和空间结构。其次,将所有地质认识和实际观测数据加入GANs结构中是困难的,如匹配压力数据,且该方法对数据的预处理较为繁琐,缺少对应的建模商业软件,需要一定的编程基础,适用性有待提高。在建模方法上,基于深度学习的人工智能地质建模方法是未来的前沿领域,提升深度学习地质建模的精度和条件化程度是未来的重要攻关方向之一。

## 5.3 动态数据约束下的储层建模将更具有生产实效性

目前建立的缝洞型碳酸盐岩储层地质模型虽然整合了测井、地震和露头模式等各类静态地质数据和部分动态分析成果,但动态数据(如示踪剂数据、试井数据、泥浆漏失数据、压力数据等)对模型的约束却不够,导致所建立的模型虽然与统计规律相符,但可能与动态数据矛盾。而且,缝洞型储层成因复杂,目前针对成因控制约束下所建的模型与地下实际情况相比仍有较大差距,并不能有效指导生产。如何将地震、测试、动态、测井等多类数据整合,将前人在古岩溶成因主控因素研究方面的定性认识定量化导入并约束建模,都是未来缝洞型碳酸盐岩储层建模需要解决的问题。缝洞型储集体以及裂缝的建模中均利用了随机建模的方法,不确定性高,且大型溶洞缺少取心、测井等直接测量数据,在参数建模的过程中,未充填的溶洞只能按照地区经验公式直接赋值,部分充填的溶洞若无测井曲线,则按油田实测物性参数及生产状况相结合来综合标定其孔隙度,这些情况均会导致参数模型(尤其是渗透率模型)的准确度降低。针对该问题,需要在缝洞型储层参数建模方面提出更多更好的思路与方法。

## 6 结论

(1)缝洞型碳酸盐岩储层建模技术的发展分为3个阶段。在建模技术发展过程中,建模对象由缝洞系统、大型溶洞进一步细化至地下暗河等特定成因溶洞储集体;建模算法由基于变差函数的两点统计学发展到基于目标、多点地质统计学与基于深度

学习的人工智能地质建模等算法。提出了“分区分带”、“岩溶相控”、“成因约束”等多种建模方法。

(2) 断控岩溶储集体的研究多为基于露头、地震、测井等资料推断的地质模式, 储层建模仍面临诸多挑战。建模算法上, 多点地质统计建模在模拟实现连续性和解决非平稳问题上有待提高; 基于深度学习的人工智能地质建模方法在模型准确率上优于多点地质统计建模, 但其数据的预处理较为繁琐, 需要一定的编程基础, 适用性有待提高。目前建立的缝洞型碳酸盐岩储层的地质模型缺少与生产动态数据的结合, 精度仍待提高。

(3) 展望缝洞型碳酸盐岩储层建模未来的发展方向: 建模对象上, 断控岩溶建模是未来研究的重点, 需要基于断控岩溶地质认识提出新的建模方法来准确表征其内部结构; 建模算法上, 基于深度学习的人工智能地质建模方法是未来的前沿领域, 提升深度学习地质建模的精度和条件化程度是未来的重要攻关方向之一。

#### 参考文献

- [1] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. WU Shenghe. Reservoir characterization & modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [2] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications I[J]. AAPG bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [3] 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(1): 64-69. HOU Jiagen, MA Xiaoqiang, HU Xiangyang, et al. Key issues of 3D geological modeling of paleokarst-cave carbonate reservoir[J]. Geological journal of China universities, 2013, 19(1): 64-69.
- [4] 刘钰铭, 侯加根. 缝洞型碳酸盐岩油藏三维地质建模: 以塔河油田奥陶系油藏为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016. LIU Yuming, HOU Jiagen. 3D geological modeling of fracture-vuggy carbonate reservoir: a case study of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [5] 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, 16. YANG Huiting, JIANG Tongwen, YAN Qibin, et al. Establishment of 3D geological models of fracture-cavern carbonate reservoir[J]. Petroleum geology & oilfield development in Daqing, 2004, 23(4): 11-12, 16.
- [6] 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 Jiagen, MA Xiaoqiang, LIU Yuming, et al. Study on multi-class and multi-scale modeling methods for fracture-vuggy carbonate reservoirs: a case study of Ordovician reservoirs in the fourth block of Tahe Oilfield[J]. Earth science frontiers, 2012, 19(2): 59-66.
- [7] 李永强, 侯加根, 刘钰铭, 等. 基于岩溶模式的溶洞储集体三维地质建模[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 43-50. LI Yongqiang, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. 3D modeling of cave reservoirs based on karst patterns[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2016, 40(5): 43-50.
- [8] 宋随宏, 史燕青, 侯加根. 基于生成对抗网络的储层地质建模方法研究进展[J]. 石油科学通报, 2022, 7(1): 34-49. SONG Suihong, SHI Yanqing, HOU Jiagen. Review of a generative adversarial networks (GANs): based geomodelling method[J]. Petroleum science bulletin, 2022, 7(1): 34-49.
- [9] SONG Suihong, MUKERJI T, HOU Jiagen, et al. GANSim-3D for conditional geomodeling: theory and field application[J]. Water resources research, 2022, 58(7): e2021WR031865.
- [10] SONG Suihong, MUKERJI T, HOU Jiagen. Geological facies modeling based on progressive growing of generative adversarial networks (GANs) [J]. Computational geosciences, 2021, 25(3): 1251-1273.
- [11] SONG Suihong, MUKERJI T, HOU Jiagen. GANSim: conditional facies simulation using an improved progressive growing of generative adversarial networks (GANs)[J]. Mathematical geosciences, 2021, 53(7): 1413-1444.
- [12] 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 Genjiu, WANG Guihong, YU Guoyi, et al. Geological model of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum exploration and development, 2002, 29(1): 109-111.
- [13] 张淑晶, 陈福利, 金勇. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储集体三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 175-180. ZHANG Shupin, CHEN Fuli, JIN Yong. 3D modeling of Ordovician fractured-vug carbonate reservoir, Tahe Oilfield[J]. Petroleum exploration and development, 2007, 34(2): 175-180.
- [14] 万方, 崔文彬, 李士超. RMS提取技术在溶洞型碳酸盐岩储层地质建模中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 279-286, 293. WAN Fang, CUI Wenbin, LI Shichao. The application of RMS extracting technology in geologic modeling on carbonate reservoir with cavern[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 279-286, 293.
- [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 Yuming, HOU Jiagen, HU Xiangyang, et al. 3D modeling of paleokarst reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2012, 36(2): 34-38.
- [16] 刘钰铭. 缝洞型碳酸盐岩储层建模方法研究: 以塔里木盆地塔河油田奥陶系油藏为例[D]. 北京: 中国石油大学, 2009. LIU Yuming. Modeling method of fracture-vuggy carbonate reservoir: a case study of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009.

- [17] 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 Bin, HOU Jiagen, LIU Yuming. 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.
- [18] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法: 以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383-387.  
HU Xiangyang, LI Yang, QUAN Lianshun, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe Oilfield[J]. Oil & gas geology, 2013, 34(3): 383-387.
- [19] 蒋超. 塔河油田典型缝洞单元多点地质统计学建模研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020.  
JIANG Chao. Study on the multi-point geostatistical modeling of typical fracture-cavity units in Tahe Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [20] 谢鹏飞, 侯加根, 汪彦, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层多元信息融合建模方法在塔河油田十二区奥陶系油藏的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 1-14.  
XIE Pengfei, HOU Jiagen, WANG Yan, et al. Application of multi-information fusion modeling of fracture-vuggy reservoir in Ordovician reservoir of 12th block in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2023, 47(3): 1-14.
- [21] 李永强. 塔河油田碳酸盐岩缝洞单元内部非均质性定量表征[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.  
LI Yongqiang. Quantitative characterization of internal heterogeneity of carbonate fracture-cavity units in Tahe Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [22] 刘钰铭, 侯加根, 李永强, 等. 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[J]. 石油科学通报, 2018, 3(2): 125-133.  
LIU Yuming, HOU Jiagen, LI Yongqiang, et al. Modeling method for distribution of paleokarst carbonate cavern reservoirs with multiple constraints: a case study of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield[J]. Petroleum science bulletin, 2018, 3(2): 125-133.
- [23] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.  
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. Petroleum exploration and development, 2012, 39(1): 1-12.
- [24] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 827-844.  
ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim Basin[J]. Acta petrologica sinica, 2011, 27(3): 827-844.
- [25] 朱光有, 张水昌, 王欢欢, 等. 塔里木盆地北部深层风化壳储层的形成与分布[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2384-2398.  
ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, WANG Huanhuan, et al. The formation and distribution of deep weathering crust in North Tarim Basin[J]. Acta petrologica sinica, 2009, 25(10): 2384-2398.
- [26] 邹才能, 李启明, 邬光辉, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩基本特征与勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 450-453.  
ZOU Caineng, LI Qiming, WU Guanghui, et al. Basic characteristics and exploration direction of Cambrian-Ordovician carbonate rocks in Tarim Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2009, 30(4): 450-453.
- [27] ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Carbonate karst reservoirs of the Tarim Basin, northwest China: types, features, origins, and implications for hydrocarbon exploration[J]. Interpretation, 2014, 2(3): SF65-SF90.
- [28] 倪新锋, 沈安江, 乔占峰, 等. 塔里木盆地奥陶系缝洞型碳酸盐岩岩溶储层成因及勘探启示[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 144-158.  
NI Xinfeng, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Genesis and exploration enlightenment of Ordovician fracture-vuggy carbonate karst reservoirs in Tarim Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2023, 35(2): 144-158.
- [29] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 14-22.  
LÜ Haitao, HAN Jun, ZHANG Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 2021, 43(1): 14-22.
- [30] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.  
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China petroleum exploration, 2021, 26(4): 58-71.
- [31] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015(3): 347-355.  
LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2015(3): 347-355.
- [32] 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 1-13.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Huili, et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata[J]. Earth science frontiers, 2023, 30(6): 1-13.
- [33] DENG Shang, ZHAO Rui, KONG Qiangfu, et al. Two distinct strike-slip fault networks in the Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin: hydrocarbon accumulation, distribu-

- tion, and controlling factors [J]. AAPG bulletin, 2022, 106 (1): 77-102.
- [34] LI Yongqiang, SUN Jianfang, WEI Hehua, et al. Architectural features of fault-controlled karst reservoirs in the Tahe Oilfield [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2019, 181: 106208.
- [35] 张煜, 毛庆言, 李海英, 等. 顺北中部超深层断控缝洞型油气藏储集体特征与实践应用 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28 (1): 1-13.  
ZHANG Yu, MAO Qingyan, LI Haiying, et al. Characteristics and practical application of ultra-deep fault-controlled fractured-cavity type reservoir in central Shunbei area [J]. China petroleum exploration, 2023, 28(1): 1-13.
- [36] 张文彪, 段太忠, 李蒙, 等. 塔河油田托甫台区奥陶系断溶体层级类型及表征方法 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 314-325.  
ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, LI Meng, et al. Hierarchical types and characterization methods of Ordovician fault solution in Toputai area, Tahe Oilfield [J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(2): 314-325.
- [37] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征 [J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289-298.  
LI Yang, JIN Qiang, ZHONG Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2016, 37(3): 289-298.
- [38] 张文彪, 段太忠, 赵华伟, 等. 断控岩溶体系空间结构差异性与三维建模: 以顺北1号断裂带为例 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12094-12108.  
ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, ZHAO Huawei, et al. Hierarchical characteristics and 3D modeling of fault-controlled paleokarst systems: a case study of Shunbei1 strike-slip fault zone [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(28): 12094-12108.
- [39] CHOQUETTE P W, PRAY L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG bulletin, 1970, 54(2): 207-250.
- [40] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(1): 1-7.  
LI Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2012, 36(1): 1-7.
- [41] KLIMCHOUK A B, FORD D C. Types of karst and evolution of hydrogeologic setting [M]. Huntsville, AL: National Speleological Society, 2000: 45-53.
- [42] 张宇, 赵伦, 李长海, 等. 古岩溶油气储层研究进展 [J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 808-824.  
ZHANG Yu, ZHAO Lun, LI Changhai, et al. Research progress of paleokarst oil and gas reservoirs [J]. Carsologica sinica, 2022, 41(5): 808-824.
- [43] 景建恩, 魏文博, 梅忠武. 塔河油田奥陶系岩溶洞穴发育特征及其与油气的关系 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(5): 622-625.  
JING Jianen, WEI Wenbo, MEI Zhongwu. Discussion on development regularities of karst cave on top of the Ordovician of Tahe Oilfield and relation in oil-gas [J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2005, 35(5): 622-625.
- [44] 李阳, 侯加根, 李永强. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600-606.  
LI Yang, HOU Jiagen, LI Yongqiang. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs [J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(4): 600-606.
- [45] 马晓强. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏储层内部结构研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2014.  
MA Xiaoqiang. Architecture of carbonate fracture-cave reservoirs in Ordovician of Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2014.
- [46] 张三, 金强, 胡明毅, 等. 塔河地区奥陶系不同地貌岩溶带结构组合差异与油气富集 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48 (5): 962-973.  
ZHANG San, JIN Qiang, HU Mingyi, et al. Differential structure of Ordovician karst zone and hydrocarbon enrichment in paleogeomorphic units in Tahe area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(5): 962-973.
- [47] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 塔河油田海西早期古水文地貌特征及其对洞穴发育的控制 [J]. 石油学报, 2016, 37(8): 1011-1020.  
LI Yuan, LU Xinbian, CAI Zhongxian, et al. Hydrogeomorphic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe Oilfield [J]. Acta petrolei sinica, 2016, 37(8): 1011-1020.
- [48] 邹明倬. 塔河油田六七区典型地下河型岩溶缝洞储集体建模研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2020.  
ZOU Mingzhuo. The Study on geological modeling of the typical underground river type fracture-cave karst reservoirs in the 6th and 7th block, Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [49] 张三, 金强, 程付启, 等. 古岩溶流域内地表河与地下河成因联系与储层特征: 以塔河油田奥陶系岩溶为例 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 900-910.  
ZHANG San, JIN Qiang, CHENG Fuqi, et al. Genetic relationship and reservoir characteristics of surface and underground rivers in paleokarst watershed: a case study of Ordovician karst in Tahe Oilfield [J]. Carsologica sinica, 2020, 39 (6): 900-910.
- [50] 刘学利, 汪彦. 塔河缝洞型油藏溶洞相多点统计学建模方法 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(6): 53-58.  
LIU Xueli, WANG Yan. Multi-point statistical modeling method for karst cavern phase in Tahe fracture-cavern reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2012, 34(6): 53-58.
- [51] 陈培元, 杨辉廷, 刘学利, 等. 塔河油田6~7区孔洞型碳酸盐岩储层建模 [J]. 地质论评, 2014, 60(4): 884-892.  
CHEN Peiyuan, YANG Huiting, LIU Xueli, et al. 3D modeling of vug carbonate reservoir in the sixth-seventh blocks of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Geological review, 2014, 60

- (4): 884–892.
- [52] 何治亮, 孙建芳, 郭攀红, 等. 碳酸盐岩储集层知识库构建方法及其在缝洞型油藏地质建模中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 710–718.  
HE Zhiliang, SUN Jianfang, GUO Panhong, et al. Construction method of carbonate reservoir knowledge base and its application in fracture–cavity reservoir geological modeling[J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(4): 710–718.
- [53] ALLARD D, COMUNIAN A, RENARD P. Probability aggregation methods in geoscience[J]. Mathematical geosciences, 2012, 44: 545–581.
- [54] 韩杰, 袁源, 肖春艳, 等. 塔中 I 号气田 TZ83 井区环状断溶体储层发育特征及油气聚集规律[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 234–242.  
HAN Jie, YUAN Yuan, XIAO Chunyan, et al. Development characteristics and oil–gas accumulation rules of fault–karst reservoir of TZ83 well area in Tazhong I Gasfield[J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(3): 234–242.
- [55] 常少英, 崔仕提, 曹鹏, 等. 碳酸盐岩断溶体构型地震表征关键技术及应用[J]. 海相油气地质, 2022, 27(2): 192–200.  
CHANG Shaoying, CUI Shidi, CAO Peng, et al. Key techniques and applications of seismic characterization of carbonate fault–karst configuration[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(2): 192–200.
- [56] 张文彪, 张亚雄, 段太忠, 等. 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系层次建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 207–218.  
ZHANG Wenbiao, ZHANG Yaxiong, DUAN Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault–karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Oil & gas geology, 2022, 43(1): 207–218.
- [57] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 203–212.  
DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning–based geological modeling of ultra–deep fault–karst reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2023, 44(1): 203–212.

编辑:黄革萍

## Advance in geological modeling methods of fracture–cavity carbonate reservoirs

WANG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Yintao<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, YAO Chao<sup>2</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>

1. Development Research Institute, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development;
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina

**Abstract:** The fracture–cavity carbonate reservoirs is characterized by complex spatial distribution and high heterogeneity. The establishment of an accurate and reliable three–dimensional geological model is fundamental and essential for the efficient development of such reservoirs. This paper presents a comprehensive overview of the developing stages in the technology and methods employed for modeling fracture–cavity carbonate reservoirs. The evolution of fracture–cavity reservoir modeling can be delineated into three distinct phases: In the first phase, reservoir modeling techniques introduce concepts like "zone division" and "karstic control" as methods for modeling reservoir bodies, with a primary reliance on variogram–based statistical algorithms. In the second phase, it is emphasized of the modeling of internal cave structures, which involves categorizing cave types and summarizing different combinations of cave types. These endeavors are underpinned by the application of geological constraints to construct various karstic control models, with a predominant focus on target–based and multi–point geological statistics as modeling algorithms. In the third phase, the researcher further delve into the causal factors governing the formation of reservoir bodies, specifically focusing on factors such as underground rivers. For these unique causal factor–driven cave reservoirs, field outcrop and cave data were employed to construct training images. Mathematical integration of prior geological causative models and posterior seismic responses result in the development of comprehensive constraint probability bodies. The models generated in this phase exhibit finer detail and have the capacity to represent internal structural elements within underground river reservoirs. This paper concludes by offering a forward–looking perspective on the technological advancements in geological modeling of fracture–cavity carbonate reservoirs. It highlights the imperative need for further research in fracture–controlled karst reservoir modeling methods and underscores that the future trajectory lies in artificial intelligence geological modeling methods based on deep learning.

**Key words:** carbonate rock; fracture–cavity reservoir; geological modeling; probability fusion; Tahe Oilfield

**WANG Qi**, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in research related to deep and ultra–deep carbonate reservoir development. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E–mail: wangqi.riped@petrochina.com.cn