

# 多源断控岩溶型溶洞训练数据集构建和生成对抗网络三维建模应用

胡迅, 侯加根\*, 刘钰铭

中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

\* 通信作者, houjg63@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-10-18

国家自然科学基金面上项目(42072146)资助

**摘要** 目前, 尚未存在全面的断控岩溶型溶洞训练数据集用于深度学习建模。本文采用基于露头资料、地震数据、可靠的地质模型以及基于目标的方法研制了断控岩溶型溶洞原型模型, 对不同来源的原型模型集进行组合、旋转、裁剪和优选操作来构建可靠且多样的断控岩溶型溶洞相训练数据集, 同时构建相应的虚拟井和概率体训练数据集, 作为训练条件化生成对抗网络的数据输入。将训练好的生成器卷积神经网络应用于塔河油田TH12330井区, 生成的多个断控岩溶型溶洞地质模型符合地质模式, 吻合条件井、概率体数据, 且与构造、裂缝和累产基本一致。本研究探索了断控岩溶型溶洞多源训练数据集的构建并在实际应用中取得了显著成果, 同时也为其它类型储层深度学习建模中构建可靠且多样化的训练数据集提供了新思路。

**关键词** 断控岩溶型溶洞; 训练数据集; 生成对抗网络; 深度学习; 地质建模

中图分类号: TE327; P618.13

## Construction of a multi-source fault-controlled karst cave training dataset and application in three-dimensional modelling using generative adversarial networks

HU Xun, HOU Jiagen, LIU Yuming

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

Received: 2023-09-14; Revised: 2023-10-18

**Abstract** Currently, there is no comprehensive training dataset available for the modelling of fault-controlled karst caves using deep learning. In this study, we constructed prototype models for fault-controlled karst caves using outcrop data, seismic data, reliable geological models, and object-based methods. We combined, rotated, cropped, and selected prototype models from different sources to create a reliable and diverse training dataset for fault-controlled karst caves. Additionally, we constructed corresponding virtual well and probability map training datasets, all of which were used to train conditional generative adversarial networks (GANs). The trained generator convolutional neural network was applied to TH12330 well block, Tahe Oilfield. The generated multiple geological

引用格式: 胡迅, 侯加根, 刘钰铭. 多源断控岩溶型溶洞训练数据集构建和生成对抗网络三维建模应用. 石油科学通报, 2024, 03: 422-433

HU Xun, HOU Jiagen, LIU Yuming. Construction of a multi-source fault-controlled karst cave training dataset and application in three-dimensional modelling using generative adversarial networks. Petroleum Science Bulletin, 2024, 03: 422-433. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.031

models for fault-controlled karst caves were consistent with geological patterns, conditioning well data, conditioning probability map data, and aligned with fracture structures, fractures, and cumulative production. This research explores the construction of a multi-source training dataset for fault-controlled karst caves and has achieved significant success in a real application example. Furthermore, it provides new insights into building reliable and diverse training dataset for deep learning modelling in other types of reservoirs.

**Keywords** fault-controlled karst caves; training dataset; generative adversarial networks; deep learning; geological modelling

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.031

## 0 引言

三维地质建模在石油和天然气勘探和开发领域发挥着关键作用,能够预测储量、指导开采方案,以及更好理解地下地质结构<sup>[1-3]</sup>。传统的序贯指示<sup>[4-5]</sup>、基于目标<sup>[6]</sup>、基于过程<sup>[7]</sup>、地震属性阈值截断<sup>[8-11]</sup>和多点地质统计<sup>[12-13]</sup>方法均尝试应用于断控岩溶型溶洞模拟,这些方法在同时保留地质真实性和条件化数据时具有很大的挑战。近年来,基于深度学习的地质建模方法逐渐受到关注<sup>[14]</sup>,其中利用生成对抗网络(GANs)<sup>[15]</sup>已成功重现多种碎屑岩地质相建模场景,例如河道<sup>[16-17]</sup>、辫状河<sup>[18]</sup>、三角洲<sup>[19-20]</sup>。而针对受后期改造作用明显的缝洞型油藏深度学习建模研究较少,段太忠<sup>[21]</sup>选择图像转换网络作为断溶体深度学习建模方法,来建立地震数据与断溶体分布的映射关系。然而,基于数据驱动模型设计和性能主要依赖于大规模数据的输入,该方法仍缺乏大规模的训练样本。Song<sup>[22]</sup>以地下暗河型溶洞的成因机理和分布规律为基础,基于仿过程的方法构建了大量三维训练样本,应用于条件化生成对抗网络GANSim-3D的训练和塔河油田实际区的建模。与基于少样本的深度学习<sup>[23]</sup>相比,基于多样本的深度学习有助于模型更好地理解复杂的地质模式,提高模型的泛化能力,同时使模型更具有鲁棒性。数据集的扩充在深度学习任务中也发挥着重要作用,可通过几何变化、颜色变化、噪声添加、切割和裁剪等方式来解决数据不足和过拟合问题。目前尚未存在断控岩溶型溶洞训练数据集应用于多样本的深度学习建模。因此,本文研制了可靠且多样的断控岩溶型溶洞训练数据集,数据集扩充和优选后作为训练GANSim-3D的数据输入,并将训练好的生成器成功应用于塔河油田TH12330井区,获得了多个符合断控岩溶型溶洞模式和条件数据的地质模型。通过构造、裂缝和累产数据,证实了模拟结果的可靠性。

## 1 断控岩溶型溶洞原型模型的建立

原型模型指与模拟目标区储层特征相似的露头、

开发成熟油田的密井网区或现代沉积环境的精细储层模型。原型模型建立的重要目的是为目标区储层建模提供模拟参数,如溶洞高宽比分布、变差函数和训练图像等<sup>[24-25]</sup>。目标区的建模精度又由开发需求决定,因此“精细储层模型”较难界定,本文将对目标区建模具有借鉴意义的储层模型广义地定义为原型模型。以地质认识为基础,可通过不同的方式来构建断控岩溶型溶洞原型模型,包括基于野外露头资料、基于可靠地质模型、基于地震数据和基于目标的方法等。

### 1.1 基于野外露头资料

野外露头观察在地质研究中具备不可或缺的重要性,因其具备直观、真实可靠、高精度以及低获取成本等优点<sup>[26]</sup>。解剖野外露头通常用于指导相似沉积环境下地下储层的地质建模。数据解剖的方法包括无人机拍摄、测量点采集和测量以及取样分析等,这些方法用于描绘储集体几何形态和内部特征,以进一步深化对储集体发育规律和控制因素的理解。

相似现代和古代断控岩溶型溶洞的野外露头观点包括塔北西克尔沟、三间房、一间房、大湾沟、硫磺沟和小而布朗克等。断控岩溶型溶洞分为溶洞体(核心洞)和孔缝体(非核心洞)两个组成部分。核心洞体积较小,根据其充填情况可进一步细分为未充填型、砂泥充填型以及垮塌角砾充填型<sup>[27]</sup>,容易区分其轮廓;非核心洞的体积相对较大,主要由小孔隙的溶蚀孔洞和裂缝进行沟通,不易区分其轮廓。按照溶洞高宽比值,可将溶洞形态分为3类:扁圆型(小于0.5)、近圆型(在0.5和2之间)和瘦长型(大于2)。图1展示了部分露头区断控岩溶型溶洞照片,图1a中核心洞为孤立洞穴,位于储集体的下方,近圆型;图1b为洞穴联合体,发育在储集体的中部,为瘦长型。

由于大的溶洞在地表容易发生垮塌,野外露头观测的溶洞规模通常会小于地下溶洞规模。例如,通过对巴楚露头观测,发现溶洞规模主要集中在0.2~5 m范围内;而根据塔河四区的溶洞钻遇情况,溶洞规模普遍大于5 m。因此采用细网格来构建小规模的断控岩溶型溶洞原型模型,网格大小为

0.1 m × 0.1 m × 0.1 m。二维野外露头照片生成三维溶洞模型较困难,本次主要根据地质经验来建立可能的三维断控岩溶型溶洞原型模型,包括断控岩溶型溶洞的发育特征和规律信息。此外,采用地质统计学<sup>[28]</sup>和深度学习<sup>[29]</sup>方式也可通过二维剖面来重构三维断控岩溶型溶洞原型模型。

## 1.2 基于地震数据体

断控岩溶型溶洞与围岩之间的地球物理属性差异,导致了明显的各向异性现象,这种差异在地震波动力学和运动学参数中产生变化,从而在地震数据中呈现特定的响应特征。中型和大型溶洞通常可根据优选的地震属性截断来识别<sup>[30]</sup>,比如波阻抗反演体<sup>[31-33]</sup>,均方根振幅体<sup>[13]</sup>和结构张量体<sup>[32-34]</sup>;而小型溶洞往往难以通过地震数据检测和识别<sup>[35-36]</sup>。

以塔河S99区为例,区域范围为88 km<sup>2</sup>,可采样的网格精度受地震分辨率的限制,x,y和z方向的网格数量分别为593、659和120,网格大小为15 m × 15 m × 5 m。根据暴露区岩溶、浅埋藏型岩溶和深埋藏型岩溶的放空漏失井段与结构张量属性和波阻抗反演体之间的对应关系发现,结构张量属性可较好

地反映非核心洞的轮廓,阈值为400;波阻抗反演体可较好地反映核心洞的空间分布,阈值为 $1.268 \times 10^7$ 。从波阻抗体的阈值截断可发现,在西北区域靠近模型顶面以下会形成连片的表层低波阻抗区域,被解释为风化壳储集体。因此,需结合地质认识通过人为修正的方式来去掉表层成片存在的风化壳储集体。最后将波阻抗反演体和结构张量体两者叠加雕刻断控岩溶型溶洞储集体空间分布,来获得原型模型,其形态特征与基于野外露头资料建立的溶洞原型模型相似,验证了基于地震数据体阈值截断获得原型模型的可靠性(图2)。

## 1.3 基于可靠的地质模型

可靠的地质模型是通过地质学、地球物理学、地球化学和石油工程等多学科领域专家共同努力下构建而成,基本吻合现有的地质认识(如成因规律和溶洞模式)和动静态数据(如井解释数据和产量数据),对油气储量预算和开采方案的制定具有重要意义。

本次用于构建断控岩溶型溶洞原型模型的成熟的塔河实际区包括S65区、TK667区和TK619区。以成熟的塔河S65区为例,不规则区域面积为9.18 km<sup>2</sup>,网格大小为10 m × 10 m × 2 m。尽管该区域以发育地下

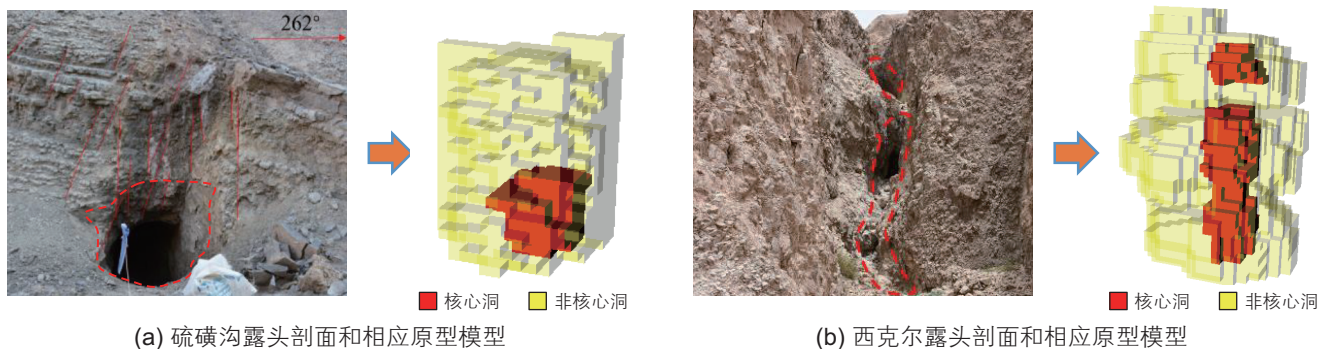


图1 基于硫磺沟和西克尔野外露头照片构建的断控岩溶型溶洞原型模型

Fig. 1 Construction of prototype models of fault-controlled karst caves based on photos of outcrops in the Liuhuanggou and Xikeer Er fields

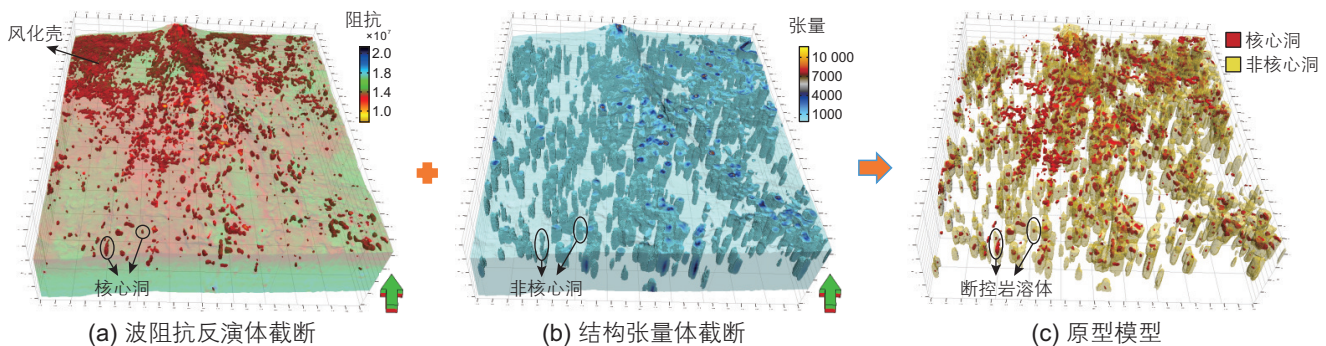


图2 基于塔河油田S99井区地震数据构建的断控岩溶型溶洞原型模型

Fig. 2 Construction of prototype model of fault-controlled karst caves based on seismic data of S99 well block, Tahe Oilfield

暗河型溶洞为主,零星发育的断控岩溶型溶洞对原型模型集的构建仍具有借鉴意义。已建立的可靠的地质模型中的储集空间包括裂缝、风化壳、地下暗河型溶洞和断控岩溶型溶洞,提取的断控岩溶型溶洞即可作为原型模型(图3)。可靠的地质模型也不是一成不变的,随着钻井数量的增加、高精度地震数据的重新采集和开采数据的不断丰富,已建立的可靠地质模型仍需要持续实时更新,来吻合新的地质认识和动静态数据。

#### 1.4 基于目标的方法

基于野外露头观测、地震数据的转换和可靠的地质模型,构建的断控岩溶型溶洞模型数量有限,难以全面捕捉溶洞地质模式。利用基于塔河断控岩溶型溶洞发育的地质知识(如空间形态、发育密度、规模、高宽比分布和演化模式等)<sup>[37-40]</sup>,提出了一种基于目标的方法来扩充断控岩溶型溶洞原型模型方法。单个断控岩溶型溶洞原型模型的网格数量为 $256 \times 256 \times 64$ ,网格大小为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ,规模较大的断控岩溶型溶洞原型模型能够裁剪成较多的训练数据,从而为

训练数据的扩充和优选提供充足的数据基础。基于目标的断控岩溶型溶洞生成算法的主要输入参数见表1,具体流程如下(图4)。

步骤1:随机生成大尺度裂缝。考虑断裂带的分布、主要断层的走向和长度等;这些大尺度裂缝将作为整个模型的基础,为后续中、小尺度裂缝和溶洞的发育提供依据;

步骤2:随机生成中尺度裂缝。考虑中尺度裂缝的长度、宽度以及数量等参数;这些裂缝大概率在大尺度裂缝附近聚集,或者与大尺度裂缝呈交叉分布;

步骤3:随机生成小尺度裂缝。基于已有的中、大尺度裂缝的分布,生成小尺度裂缝的位置;

步骤4:随机生成断控岩溶型溶洞模型。保存发育断控岩溶型溶洞的网格位置及与溶洞形态有关的参数值,包括椭球型溶洞的中心位置、长、宽和高,非核心洞和核心洞的比值,非核心洞和核心洞的不规则系数等。其中非核心洞和核心洞的半径比值可参考基于地震数据阈值截断获得的断控岩溶型溶洞原型模型,核心洞和非核心洞的长、宽和高规模可参考野外露头

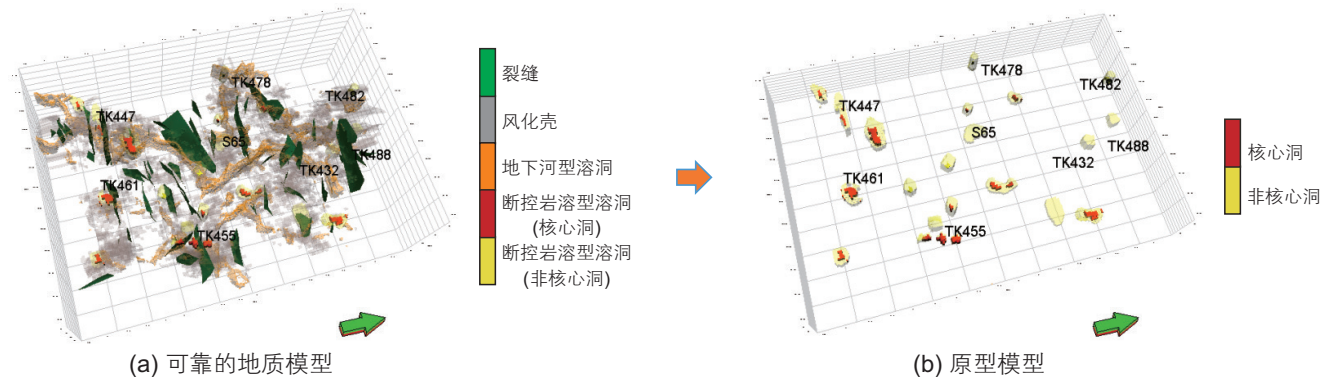


图3 基于塔河油田S65井区可靠地质模型构建的断控岩溶型溶洞原型模型

Fig. 3 Construction of prototype model of fault-controlled karst caves based on the reliable geological model of S65 well block, Tahe Oilfield

表1 基于目标的断控岩溶型溶洞构建算法参数表

Table 1 Parameter table of object-based fault-controlled karst caves construction algorithm

输入参数	参数值
网格数量	$256 \times 256 \times 64$
网格大小/m	$10 \times 10 \times 2$
核心洞的长/m	[0.2, 150]
核心洞的宽/m	[0.2, 150]
核心洞的高/m	[0.3, 70]
核心洞的不规则系数	(0.8, 0.3)
非核心洞的不规则系数	(0.5, 0.2)
非核心洞与核心洞的半径比值	(5.5, 2.5)

注:  $(a, b)$ 表示服从均值为 $a$ , 方差为 $b$ 的正态分布;  $[c, d]$ 表示服从最小值为 $c$ , 最大值为 $d$ 的均匀分布。

数据和前人相关的文献<sup>[4, 41-42]</sup>。

从生成的断控岩溶型溶洞平面图可见，溶洞受断裂控制作用明显，在断裂交汇位置溶洞发育概率较大(图4)。图5展示了基于目标的方法生成的两个断控岩溶型溶洞三维模型，其形态特征也基本符合野外露头观测。

## 2 实际模型研究

### 2.1 区域概况

塔河油田位于塔里木盆地北部，地区构造主要在

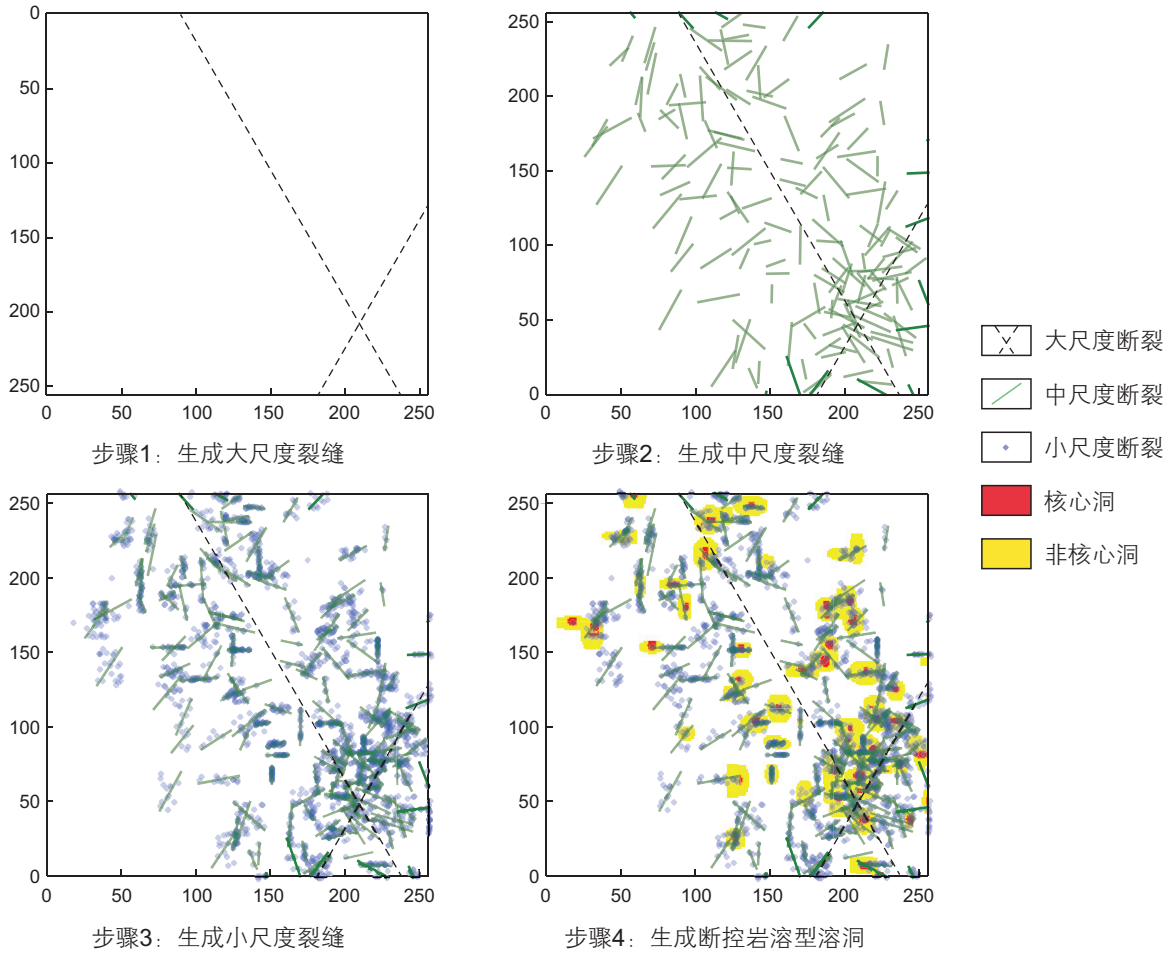


图4 基于目标的方法构建断控岩溶型溶洞流程示意图

Fig. 4 Schematic workflow chart of constructing fault-controlled karst caves using the object-based method

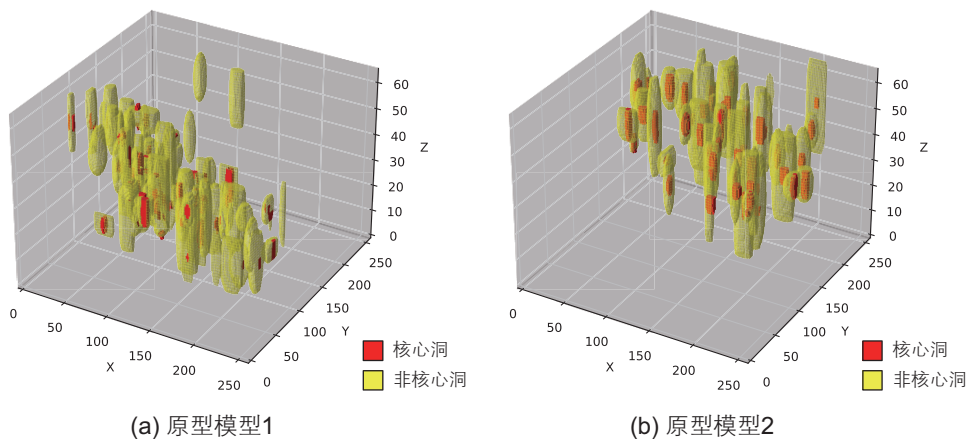


图5 基于目标的方法构建的断控岩溶型溶洞原型模型

Fig. 5 Construction of prototype models of fault-controlled karst caves using the object-based method

阿克库勒凸起西南部，少部分位于满家尔坳陷区北部。该油田中下奥陶统的一间房组和鹰山组是主要的含油气层位，发育碳酸盐岩缝洞型储集体，缝洞体受岩溶、构造和断裂多重因素控制，主要储集体类型为溶孔和溶洞。TH12330井区位于12区中部，S99断裂北延区域的TH12330断垄带，东高西低的斜坡构造。研究区水系欠发育，储集空间为断裂形成的空间，而非依赖溶蚀作用，“窄、陡”的断隆高部位岩溶储层普遍性差，局部发育规模储集体。

2.2 多源断控岩溶型溶洞训练数据集的构建

可靠且多样的数据集的构建为生成对抗网络的训练提供了坚实的基础，不同方式构建的原型模型集具有不同的精度和规模，因此需要进行预处理以作为生成对抗网络在训练过程中的输入数据。综合考虑训练时间成本和实际区建模精度，选择训练数据网格数为 $64 \times 64 \times 64$ ，网格大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。

基于野外露头数据的原型模型具有较高的精度，但规模相对较小，因此单个原型模型难以构建出训练数据集。为了解决这一问题，采取了按比例放大原型

模型并适当组合的方法来构建断控岩溶型溶洞训练数据集，在组合过程中参考了基于地震数据构建的原型模型的溶洞发育密度参数。地震数据通常涵盖广，但其分辨率较低，难以捕捉小尺度的地质特征。因此，基于地震数据的原型模型精度偏低，但规模较大，通过裁剪可获得训练数据集。基于可靠地质模型的原型模型精度适中，但通常模型范围较小，导致裁剪获得的数据集缺乏多样性，通过旋转可适当扩充训练数据集。相比之下，基于目标方法构建的原型模型不受精度和规模的限制，因此该方法构建的训练数据集呈现出更多的多样性。然而，该方法构建的训练数据集在一定程度上缺乏可靠性，需进行优选处理(图6)。t分布随机邻居嵌入(t-SNE)是一种非线性降维技术，可用在计算复杂性较高的大型数据集上。采用t-SNE优选基于目标方法生成的训练数据集，优选遵循的原则是保留与其它方式构建的训练数据集结构相似(距离近)的训练数据(图7)。

最终，通过组合、旋转、裁剪和优选操作，成功构建了15700个断控岩溶型溶洞相训练数据集(表2)。另外，为了实现生成对抗网络的条件化模拟，额外构建了

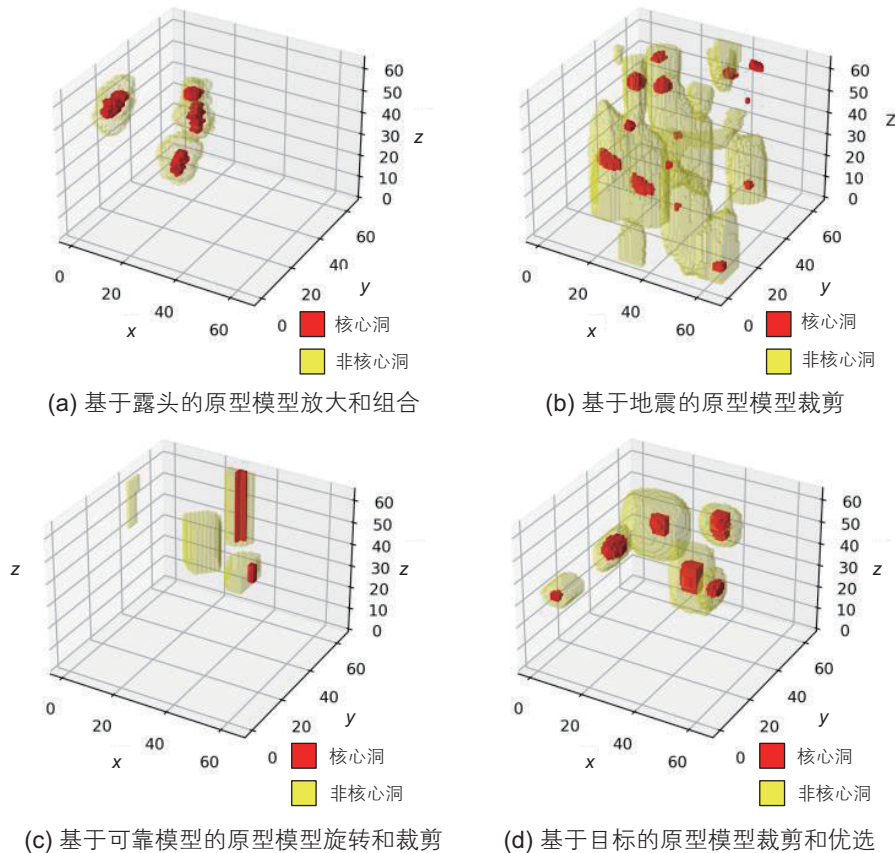


图6 原型模型预处理后获得的相训练数据集

Fig.6 The obtained facies training dataset after preprocessing of the prototype models

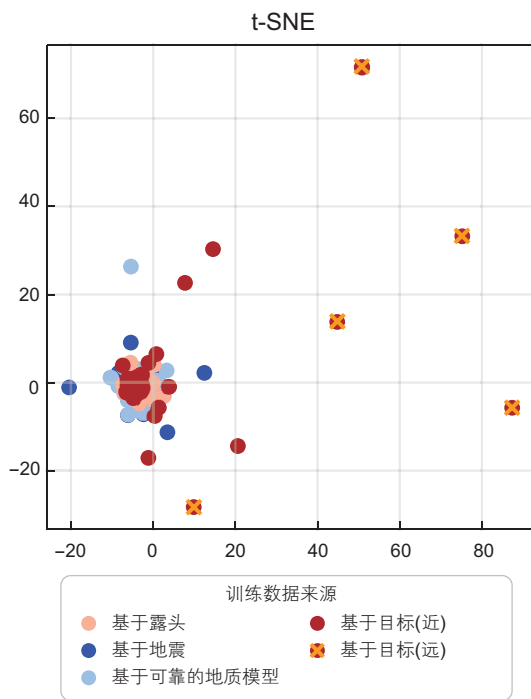


图7 训练数据集的优选  
Fig. 7 Selection of the training dataset

相应的井解释相数据和概率体数据, 其中井解释相数据是在相数据的基础上随机选取1~15口虚拟井获得, 概率体数据采用相模型和三维高斯核卷积获得(图8)。

### 2.3 生成对抗网络的训练

生成对抗网络建模方法通过断控岩溶型溶洞生成器来将溶洞尺寸和发育频率等断控岩溶发育模式认识融合起来。采用条件化生成对抗网络GANSim-3D<sup>[22]</sup>

表2 断控岩溶型溶洞训练数据构建方式及数量

Table 2 Construction method and quantity of the training data for fault-controlled karst caves

构建方式	原型模型数量/个	训练数据集数量/个
基于野外露头	23	50
基于地震数据	5	500
基于塔河可靠的地质模型	3	150
基于目标	500	15 000
合计	531	15 700

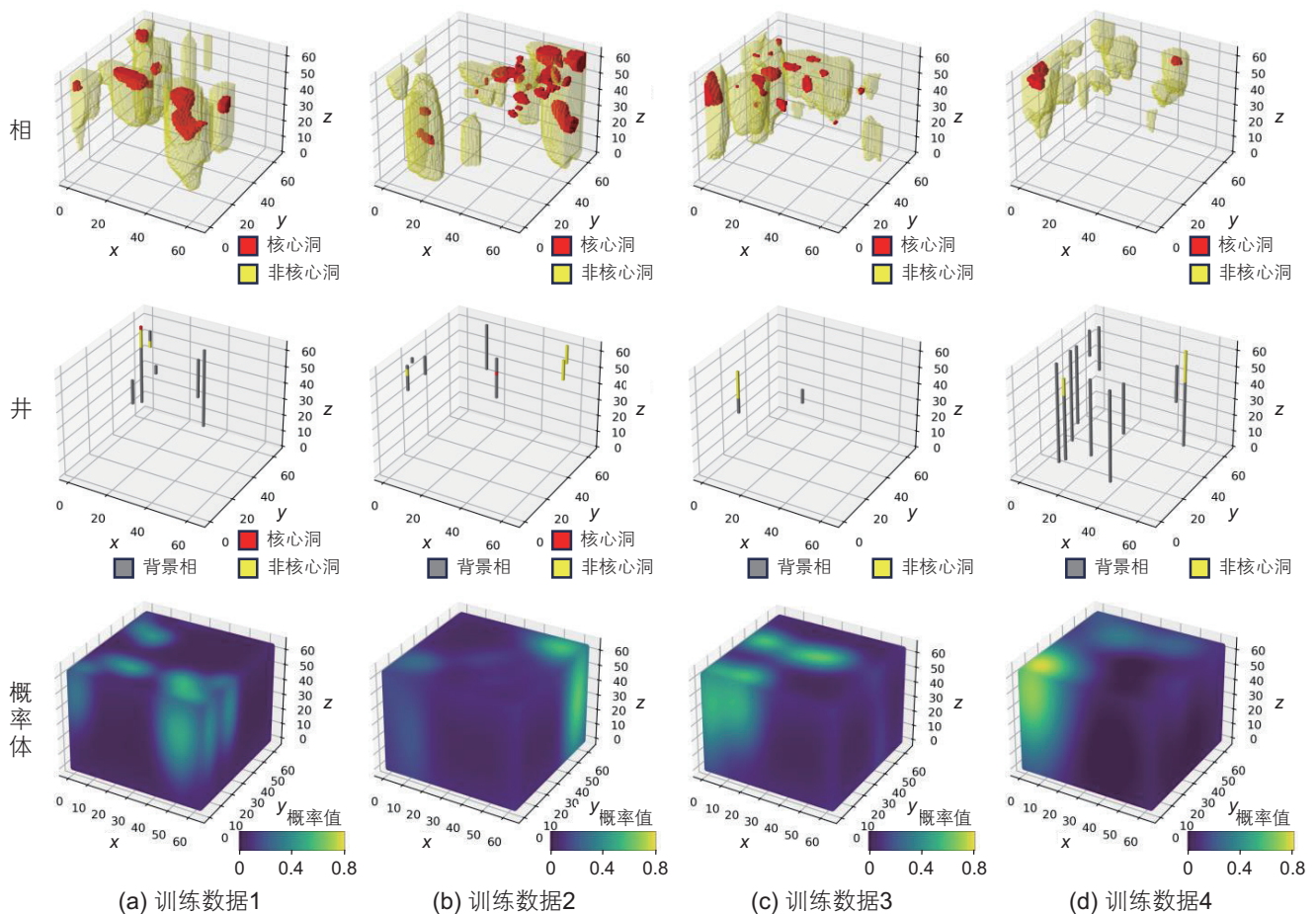


图8 相、井和概率体训练数据集  
Fig. 8 The facies, well, and probability maps training dataset

来同时学习地质模式知识和条件化数据，网络结构见图 9。训练在 TensorFlow 平台上并使用 2 个 NVIDIA Tesla V100 GPU 并行执行，目视检查作为停止训练过程的主要标准。训练时间为 17 h，大量的训练轮次 (7000 次) 可确保训练期间的收敛。

2.4 训练好的生成器的工区地质建模应用效果

将训练好的生成器卷积神经网络应用于塔河

TH12330 井区断控岩溶型溶洞建模，实际区范围 1920 m × 2080 m × 160 m，建模网格大小为 10 m × 10 m × 2 m。图 10 展示了实际区条件数据，包括井解释相数据和综合概率体数据。综合概率体采用基于数据独立性的多元条件概率融合方法构建，包括构造、断层、组抗体和结构张量体共同约束。调整输入潜在向量体的大小 (12 × 13 × 10 × 8) 后，将不同的潜在向量体和条件数据同时输入到训练好的生成器卷积神经网络

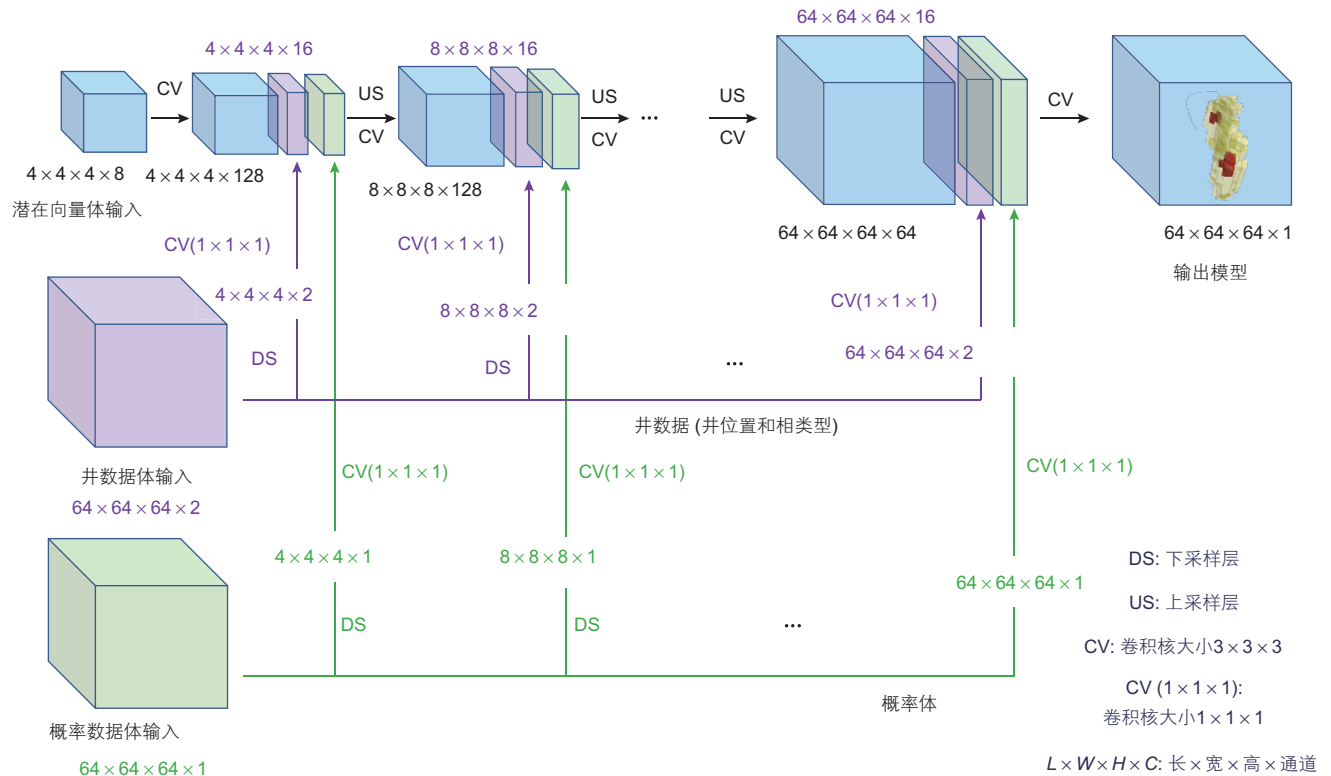


图 9 GANSim-3D 生成器卷积神经网络结构<sup>[22]</sup>

Fig. 9 The generator convolutional neural network structure in GANSim-3D<sup>[22]</sup>

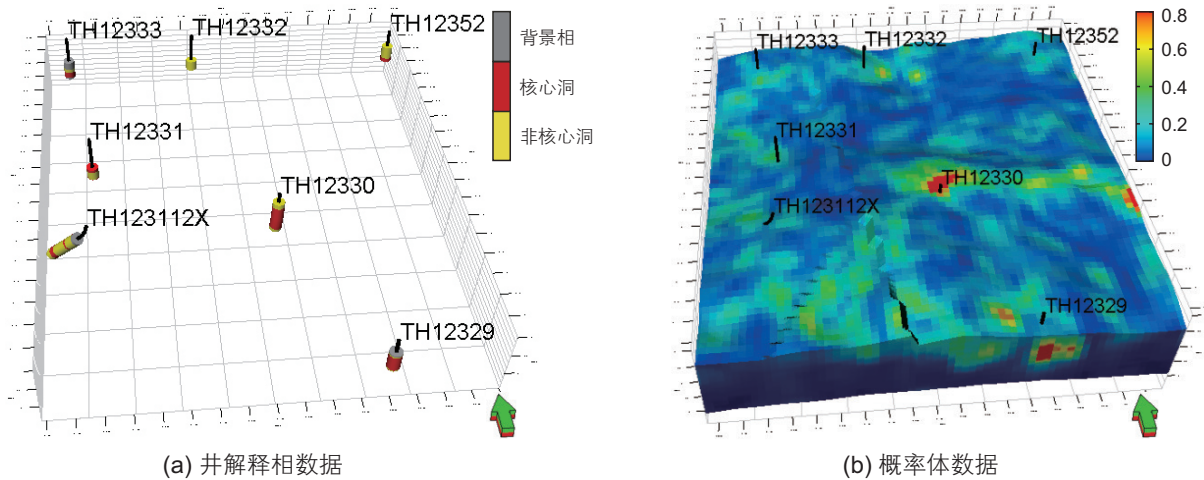


图 10 塔河油田 TH12330 井区井解释相数据和构建的断控岩溶型溶洞发育多元约束概率体

Fig. 10 The well-interpreted facies data and the constructed multi-constraint probability map for the development of fault-controlled karst caves in TH12330 well block, Tahe Oilfield



络中, 获得了多个吻合地质模式、井解释相数据和概率体数据的断控岩溶型溶洞地质模型, 形态逼真且具有多样性(图 11)。图 12 展示了井区构造、裂缝和累产与单个断控岩溶型溶洞模拟实现叠合图, 可见断控岩溶型溶洞主要发育在局部构造高部位(如 TH12333 和 TH12352); 蚂蚁体属性可反映裂缝的分布, 根据

蚂蚁体属性的阈值截断( $>-0.3$ )可见 NNE、NNW 和近 EW 的裂缝走向, 溶洞与裂缝分布相关性高; 同时单井附近断控岩溶型溶洞规模与累产基本一致(如 TH12329 井周溶洞发育, 为高产井), 均可验证基于多样本深度学习方法建立的断控岩溶型溶洞模型的可靠性。

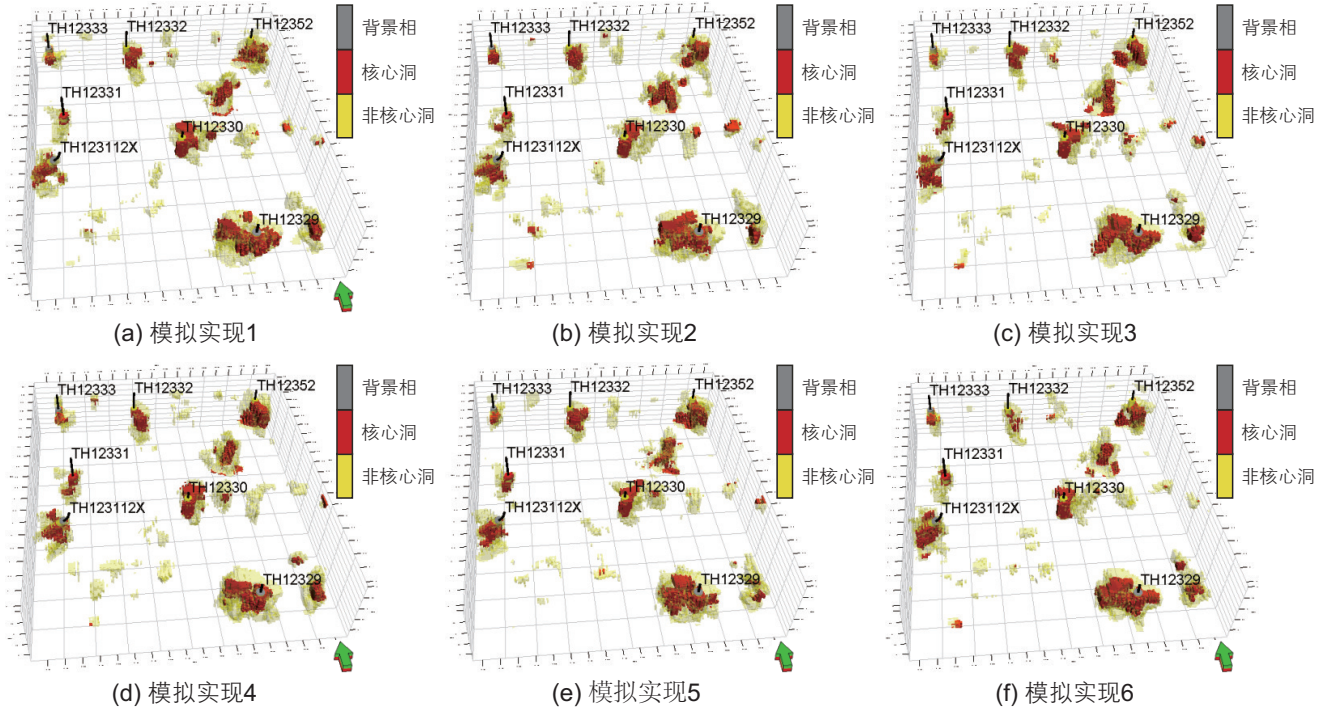


图 11 塔河油田 TH12330 井区断控岩溶型溶洞模拟实现

Fig. 11 Realizations of simulated fault-controlled karst caves in TH12330 well block, Tahe Oilfield

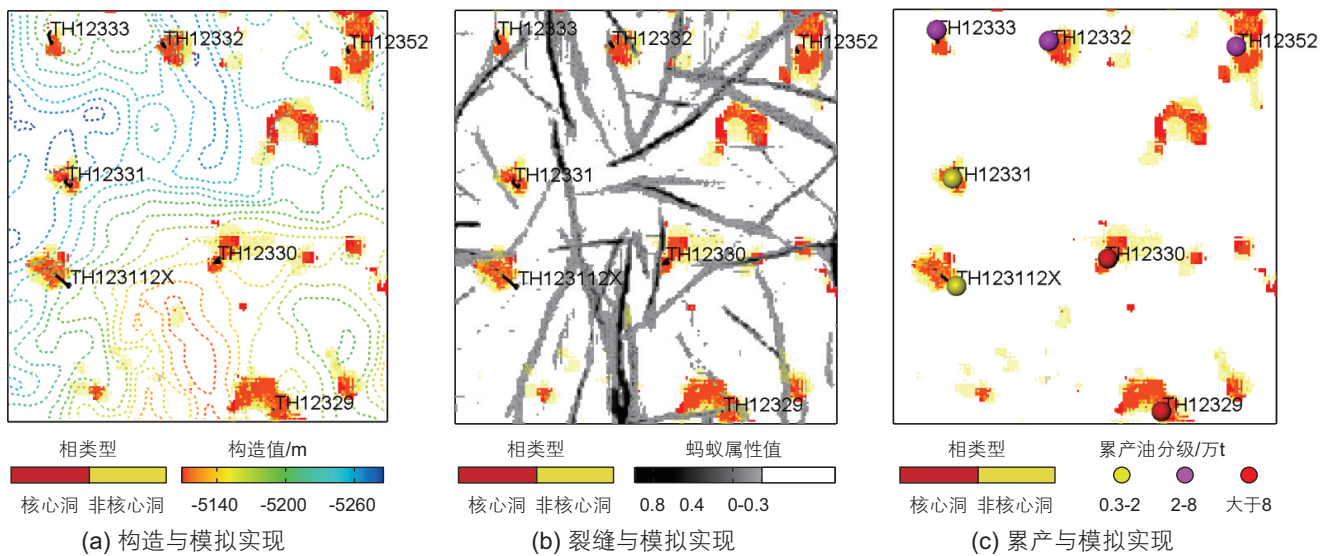


图 12 塔河油田 TH12330 井区构造、裂缝和累产与断控岩溶型溶洞模拟实现叠合图

Fig. 12 Overlay chart of structure, fractures, accumulated production, and realizations of fault-controlled karst caves in TH12330 well block, Tahe Oilfield

### 3 结论

本次采用多种方式研制了断控岩溶型溶洞原型模型集,包括基于野外露头(23个)、基于地震(5个)、基于可靠的地质模型(3个)和基于目标(500个)的方法。根据不同来源的原型模型数据特点,对原型模型进行组合、裁剪、旋转和优选操作,构建了15700个断控岩溶型溶洞相训练数据集,接着构建条件训练数据集(井和概率体)共同作为条件化生成对抗网络

GANSim-3D的数据输入,在高性能设备上迭代训练来优化生成器卷积神经网络参数。将训练好的生成器卷积神经网络应用于塔河油田实际井区,生成的断控岩溶型溶洞地质模型吻合地质模式、井数据和概率体数据,形态逼真且具有多样性,同时与构造、裂缝和累产基本保持一致。本研究探索了断控岩溶型溶洞多源训练数据集的构建并在实际应用中取得了较好效果,也为其它类型储层深度学习建模中构建可靠且多样化的训练数据集提供了新思路。

### 参考文献

- [1] 李阳,吴胜和,侯加根,等.油气藏开发地质研究进展与展望[J].石油勘探与开发,2017,44(4):569-579.[LI Y, WU S H, HOU J G, et al. Progress and prospects of reservoir development geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 569-579.]
- [2] 尹艳树,吴胜和.储层随机建模研究进展[J].天然气地球科学,2006,17(2):210-216.[YIN Y S, WU S H. The progress of reservoir stochastic modeling[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(2): 210-216.]
- [3] 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 development prospect[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(3): 53-60.]
- [4] 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 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(1): 64-69.]
- [5] 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 Y. 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.]
- [6] 吕心瑞,李红凯,魏荷花,等.碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征——以塔河油田S80单元奥陶系油藏为例[J].石油与天然气地质,2017,38(4):813-821.[LYU X R, LI H K, WEI H H, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 813-821.]
- [7] 刘彦锋,张文彪,段太忠,等.基于细胞自动机的断控岩溶过程数值模拟方法[J].科学技术与工程,2021,21(9):3550-3555.[LIU Y F, ZHANG W B, DUAN T Z, et al. Numerical simulation method for the formation of fault-karst carbonate reservoir process based on cellular automaton[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3550-3555.]
- [8] 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 W B, DUAN T Z, ZHAO H W, et al. Hierarchical characteristics and 3D modeling of fault-controlled paleokarst systems: A case study of Shunbei 1 strike-slip fault zone[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 12094-12108.]
- [9] 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 W B, ZHANG Y X, DUAN T Z, 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.]
- [10] 李阳.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J].石油学报,2013,34(1):115-121.[LI Y. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.]
- [11] 康志江,李阳,计秉玉,等.碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关键技术[J].石油与天然气地质,2020,41(2):434-441.[KANG Z J, LI Y, JI B Y, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 434-441.]
- [12] 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 P F, HOU J G, WANG Y, 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.]
- [13] 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 X L, WANG Y. Multi-point geostatistical approach to model karst facies of fracture-cavity reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest

- Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(6): 53–58.]
- [14] 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 S H, SHI Y Q, HOU J G. Review of a Generative Adversarial Networks (GANs)-based geomodelling method[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(1): 34–49.]
- [15] GOODFELLOW I J, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets[C]// International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal: MIT Press, 2014: 2672–2680.
- [16] DUPONT E, ZHANG T, TILKE P, et al. Generating realistic geology conditioned on physical measurements with generative adversarial networks[J]. ArXiv Preprint, arXiv: 1802.03065, 2018.
- [17] SUN C, DEMYANOV V, ARNOLD D. Geological realism in fluvial facies modelling with GAN under variable depositional conditions[J]. Computational Geosciences, 2023, 27: 203–221.
- [18] 李少华, 史敬华, 于金彪, 等. 基于单一图像生成对抗神经网络方法在沉积相建模中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(1): 37–45. [LI S H, SHI J H, YU J B, et al. Application of SinGAN method in sedimentary facies modeling[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 37–45.]
- [19] CHEN M, WU S, BEDLE H, et al. Modeling of subsurface sedimentary facies using Self-Attention Generative Adversarial Networks (SAGANs)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 214: 110470.
- [20] ZHU L, ZHANG T. Generating Geological facies models with fidelity to diversity and statistics of training images using improved generative adversarial networks[J]. ArXiv Preprint, arXiv: 1909.10652, 2019.
- [21] 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 T Z, ZHANG W B, HE Z L, 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.]
- [22] SONG S, MUKERJI T, HOU J, et al. GANSim-3D for conditional geomodeling: Theory and field application[J]. Water Resources Research, 2022, 58(7): e2021WR031865.
- [23] ZAKHAROV E, SHYSHEYA A, BURKOV E, et al. Few-shot adversarial learning of realistic neural talking head models[J]. ArXiv Preprint, arXiv: 2019.1905.08233.
- [24] 李少华, 张昌民, 林克湘, 等. 储层建模中几种原型模型的建立[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, (3): 102–107. [LI S H, ZHANG C M, LIN K X, et al. The construction of prototype models in reservoir modeling[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, (3): 102–107.]
- [25] 王鸣川, 商晓飞, 段太忠. 多点地质统计学建模中训练图像建立方法综述[J]. 高校地质学报, 2022, 28(1): 96–103. [WANG M C, SHANG X F, DUAN T Z. A review of the establishment methods of training images in multiple-point statistics modeling[J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28(1): 96–103.]
- [26] 石书缘, 胡素云, 冯文杰, 等. 基于 Google Earth 软件建立曲流河地质知识库[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 869–878. [SHI S Y, HU S Y, FENG W J, et al. Building geological knowledge database based on Google Earth software[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 869–878.]
- [27] 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 Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 15–21.]
- [28] 王立鑫, 尹艳树, 王晖, 等. 基于自适应空间抽样由二维剖面重构三维地质模型的方法——以加拿大某区块 McMurray 组储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 347–359. [WANG L X, YIN Y S, WANG H, et al. A method of reconstructing 3D model from 2D geological cross-section based on self-adaptive spatial sampling: A case study of Cretaceous McMurray reservoirs in a block of Canada[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 347–359.]
- [29] COIFFIER G, RENARD P, LEFEBVRE S. 3D geological image synthesis from 2D examples using generative adversarial networks[J]. Frontiers in Water, 2020, 2.
- [30] 闫相宾, 管路平, 王世星. 塔里木盆地碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征及预测[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 828–835. [YAN X B, GUAN L, WANG S X. Seismic response characteristics and prediction of carbonate rock fractured-vuggy systems in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 828–835.]
- [31] 符幸子, 徐守余, 王淑萍, 等. 塔河油田六区碳酸盐岩溶洞型储集体三维地质建模[J]. 断块油气田, 2015, 22(4): 419–424. [FU X Z, XU S Y, WANG S P, et al. 3D geological modeling of paleo-karst cave carbonate reservoir in Block 6, Tahe Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(4): 419–424.]
- [32] 吕心瑞, 孙建芳, 邬兴威, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法——以塔里木盆地塔河 S67 单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 728–737. [LYU X R, SUN J F, WU X W, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 728–737.]

- [33] 董越, 侯加根, 李永强, 等. 塔河七区溶洞储集体发育特征及物性建模[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(29): 47–53. [DONG Y, HOU J G, LI Y Q, et al. Characteristics and property modeling of cavity reservoir in Tahe Block 7[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(29): 47–53.]
- [34] 刘宝增, 漆立新, 李宗杰, 等. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 412–420. [LIU B Z, QI L X, LI Z J, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 412–420.]
- [35] 张娟, 杨敏, 谢润成, 等. 塔里木盆地塔河油田 4 区和 6 区奥陶系小尺度缝洞储集体概率识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 219–228. [ZHANG J, YANG M, XIE R C, et al. Probability-constrained identification of Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs in Blocks 4–6, Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 219–228.]
- [36] 王小垚, 曾联波, 魏荷花, 等. 碳酸盐岩储层缝洞储集体研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(8): 818–832. [WANG X Y, ZENG L B, WEI H H, et al. Research progress of the fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoir[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(8): 818–832.]
- [37] 商晓飞, 段太忠, 张文彪, 等. 断控岩溶主控的缝洞型碳酸盐岩内部溶蚀相带表征——以塔河油田 10 区奥陶系油藏为例[J]. 石油学报, 2020, 41(3): 329–341. [SHANG X F, DUAN T Z, ZHANG W B, et al. Characterization of dissolution facies belt in fracture-cavity carbonate rocks mainly controlled by fault-controlling karst: A case study of Ordovician reservoirs in the Block 10 of Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(3): 329–341.]
- [38] 宁超众, 孙龙德, 胡素云, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层岩溶类型及特征[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 15–32. [NING C Z, SUN L D, HU S Y, et al. Karst types and characteristics of the Ordovician fracture-cavity type carbonate reservoirs in Halahatang oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 15–32.]
- [39] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795–1834.
- [40] FORD D. Characteristics of dissolutional cave systems in carbonate rocks[M]. New York: Springer New York, 1988: 25–57.
- [41] 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J]. 石油试验地质, 2007, 29(3): 217–223. [KANG Y Z. Reservoir rock characteristics of paleozoic marine facies carbonate rock in the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 217–223.]
- [42] 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 Y, HOU J G, LI Y Q. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 600–606.]

(编辑 杨雅露)