

深层缝洞型油藏井间连通路程智能预测技术

康志江¹, 张冬梅², 张振坤², 王睿奇², 姜文斌², 刘坤岩¹

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国地质大学(武汉) 计算机学院, 湖北 武汉 430074]

摘要: 深层缝洞型碳酸盐岩油藏是多期地质构造和岩溶作用改造形成的油藏, 缝洞体结构复杂、非均质性强, 常规的碎屑岩油藏井间连通预测技术不适用。基于静、动态数据结合多重分形、曲线相似度分析等技术, 自动提取缝洞单元不同机理下相邻井响应程度等生产动态特征参数, 实现井间连通程度自动评价。利用深度残差网络实现地震多属性融合刻画储集体空间结构, 采用强化学习和多目标算法自动搜索三维连通路程。以塔里木盆地塔河油田不同岩溶背景典型缝洞单元为例, 自动提取的动态响应特征及三维连通路程的展布形态说明裂缝网络是风化壳岩溶井间主要连通过道, 多向连通性好; 主断裂和次级断裂是断控岩溶井间的主要通道, 沿断裂呈条带状连通; 古暗河岩溶沿多层暗河连通, 局部充填垮塌具有分段性。研究成果对深层缝洞型油藏剩余油与提高采收率研究具有较大的指导意义。

关键词: 强化学习; 多目标优化; 三维连通路程; 地震多属性融合; 岩溶系统; 缝洞型油藏; 塔河油田; 塔里木盆地

中图分类号: TE344

文献标识码: A

Intelligent prediction of inter-well connectivity path in deep fractured-vuggy reservoirs

KANG Zhijiang¹, ZHANG Dongmei², ZHANG Zhenkun², WANG Ruiqi², JIANG Wenbing², LIU Kunyan¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Deep fractured-vuggy carbonate reservoirs, usually a result of multi-stage tectonic movements and paleo-karst modification, are complex in structure and strong in heterogeneity. Conventional connectivity identification methods, primarily based on clastic rock reservoirs, are not suitable for carbonate reservoirs. This research aims to realize an automatic evaluation of inter-well connectivity by studying static and dynamic data and incorporating techniques such as multifractal and curve similarity analyses into the evaluation. These techniques can be employed to extract characteristic dynamic parameters and detect response level of neighboring wells under different mechanisms. Deep residual networks are used to integrate multi-attribute seismic data for characterizing the spatial structure of reservoirs. Additionally, reinforcement learning and multi-objective algorithms are also employed to automatically search for three-dimensional connectivity paths. Extracted dynamic response features and the distribution patterns of three-dimensional connectivity paths in typical fracture-cavity units in the Tahe oilfield with different karst backgrounds demonstrate that the fracture network serves as the primary communication channel among wells in weathered crust karst, exhibiting good multi-directional connectivity. The main and secondary faults are the primary channels connecting between wells within fault-controlled karst oil reservoirs, forming a strip-like connectivity pattern along the faults. The connectivity of paleo-underground river karst along multiple layers of underground river networks with local filling and collapse exhibiting segmental characteristics. The research results are of guiding significance for exploring remaining oil and enhancing recovery of deep fractured-vuggy reservoirs.

Key words: reinforcement learning, multi-objective algorithm, three-dimensional connectivity path, fusion of seismic

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-07-06。

第一作者简介: 康志江(1969—), 男, 教授级高级工程师, 深层碳酸盐岩油气藏开发。E-mail: kangzj_syky@sinopec.com。

通信作者简介: 张冬梅(1972—), 女, 教授、博士生导师, 智慧油田。E-mail: cugzdm@foxmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U19B6003)。

multi-attribute, karst system, fractured-vuggy reservoir, Tahe oilfield

引用格式:康志江,张冬梅,张振坤,等. 深层缝洞型油藏井间连通路径智能预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1290–1299. DOI: 10. 11743/ogg20230517.

KANG Zhijiang, ZHANG Dongmei, ZHANG Zhenkun, et al. Intelligent prediction of inter-well connectivity path in deep fractured-vuggy reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1290–1299. DOI: 10. 11743/ogg20230517.

向地球深部进军、拓展深层油气资源,对筑牢中国能源安全的资源基础具有重要的现实与战略意义。据评价,全国深层超深层油气资源达 671×10^8 t油当量,占资源总量的34%,是未来油气勘探开发的现实领域。经多年勘探开发实践,中国深层超深层油气勘探开发取得了重要进展,为中国石油工业的发展拓宽了新领域。深层缝洞型碳酸盐岩油藏是多期地质构造和岩溶作用改造形成的复杂油藏,储集体结构复杂、非均质性强^[1]。储-渗空间类型包括大型溶洞、溶孔、断裂、裂缝等,其中大型溶洞是重要的储集体,不同尺度裂缝导流能力强、压力传导快,是流体流动的重要通道。注水开发中普遍存在注入水沿主通道单向突进、部分井水窜严重、水驱动用储量较低等问题,直接影响了水驱开发效果。正确认识井间连通程度、水窜路径对控水稳油、优化生产措施、提高采收率意义重大。

一般示踪剂测试、干扰试井等测试技术^[2-3]能较好预测井间连通程度,但缝洞型油藏井间缝洞体结构与物性差异大,导致测试结果不全面,示踪剂回收率一般为30%~70%,部分邻井存在关井或不出水的情况,无法得到准确的示踪剂含量。近年来国内外众多学者也针对井间连通进行了系统预测研究,将油藏视为多井注采系统,引入多元线性回归模型^[4]、电容模型^[5]、系统分析模型^[6]等来预测井间连通程度^[7],但模型过于简化,仅适于常规碎屑岩连续介质油藏,基于溶洞、溶孔、不同尺度裂缝的复合介质油藏不适用。

缝洞型油藏不同的岩溶系统连通特征差异较大,风化壳型岩溶沿暗河横向连通为主,断控型岩溶沿断裂带纵向连通为主。井间的连通路径与洞孔缝的空间结构直接相关^[8],前人基于相干、曲率、振幅等多地震属性认识静态连通关系^[9-13],但碳酸盐岩缝洞型油藏储层埋深6 000~8 000 m,地震信号能量弱、分辨率低,受地震高精度成像精度等因素制约,影响连通路径识别的精度^[14-15]。有效融合地震多属性、示踪剂和地质数据等多信息预测缝洞体空间连通路径是最有效方法。

基于人工智能技术系统建立井间“连不连”“连通程度如何”与“怎么连”的三步法井间连通路径预测技术。①基于压力趋势、见水时间等邻井响应参数,变异

系数对比法判断油井与油井之间连通性;②基于注水前后邻近生产井指标变化幅度,多重分形谱法定量评价井间连通程度;③基于深度残差网络的地震多属性非线性融合技术刻画缝洞体空间结构,利用改进的强化学习和多目标算法自动搜索井间三维缝洞体连通路径。以塔里木盆地塔河油田缝洞单元为例,开展风化壳型、断控型和古暗河型3类岩溶系统的井间连通程度评价、连通路径自动搜索研究,为空间结构井网储量控制、水驱-气驱效果评价提供了分析依据,对深层缝洞型油藏提高采收率具有较好的指导意义^[16-17]。

1 缝洞型油藏连通路径智能预测方法

基于不同岩溶系统缝洞结构,结合生产动态数据自动提取整个缝洞单元压力下降趋势、生产井见水时间先后关系、各类激励下相邻井响应情况等多种特征,从压力与含水两个角度认识井间连通关系,判断井间是否连通。分析注水引起的井间能量变化情况,考虑到注采井间渗透率大小和注水前后生产指标变化幅度成正比,用多重分形谱刻画邻近生产井指标变化程度。构建静态搜索空间,融合地震多属性数据刻画缝洞体空间结构,基于改进强化学习自动搜索与静态特征吻合的井间三维连通路径。井间连通路径智能预测主要包括以下几个关键技术。

1.1 基于生产动态的井间连通性自动判断

缝洞型油藏生产过程是复杂的非线性动力系统,改变相互连通生产井的工作制度,井间压力场、饱和度和速度场均会重新分布,受影响井的井口压力与产量指标也会有相应的变化,因此定量分析邻近生产井生产指标变化,能有效判断井间的连通性。常用的井间动态连通性判断主要包括压力下降趋势、干扰试井等分析方法。由于不同岩溶系统复杂的缝洞结构使得油藏动态响应特征多样,频繁工作制度调整导致井间相互干扰,人工判别的主观性强、效率低、可靠性差。

本研究中将各井注采数据归一为时序数据,融合多方法设计井间连通性自动判断方法。其中压力

趋势下降法基于流压数据,采用分段线性拟合算法对数据进行趋势分析,邻井趋势线下降一致判断为井间连通。注采响应综合法基于注水井的注水量,邻井产油、产水与压力数据,考虑注水后邻井滞后反应设置滑动时间窗口,提取生产指标显著波动变化特征判断井间是否连通。新开井类干扰法与干扰试井类似,采用最小二乘法根据开井后邻井产油、产水与压力变化趋势判断新井投产对邻井的影响程度。生产特征相似性法基于经验模态分解和动态时间规整算法,根据邻井间的产液量、压力、动液面生产动态相似性判断井间是否连通。见水时间一致性法基于见水时间及含水率上升速度判别井间连通关系。研究采用变异系数法设置各评价方法权重,以综合认识流体流向,自动判断井间是否连通,具体技术框架如图1所示。

1.2 注采井间连通程度定量评价

由注水井、周围生产井及连通关系组合而成的复杂注采系统,注入水注入油层后,原油或地层水通过连通好的储层向生产井驱替,因此持续注水后相邻连通生产井会出现压力增大、动液面上升、产液量及含水率变化等特征,间接反映层内连通关系,变化幅度越大连

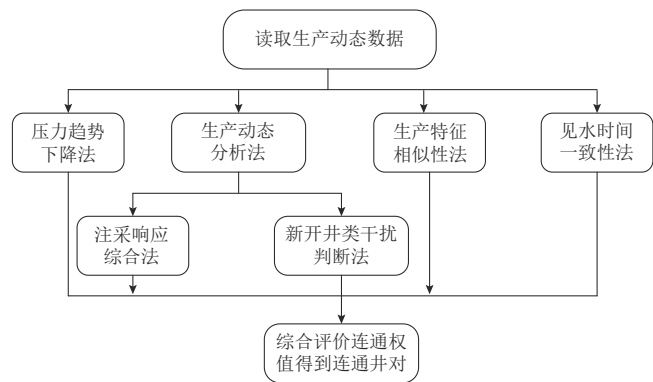


图1 连通性自动判断技术流程图

Fig. 1 Schematic diagram showing the connectivity judgment procedure

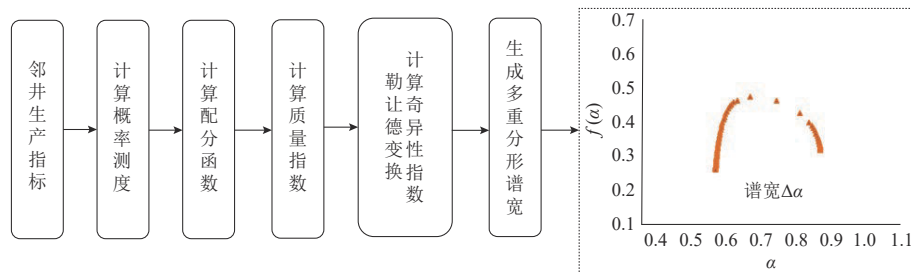


图2 基于多重分形的波动程度提取过程

Fig. 2 The extraction of fluctuation degree based on multifractal

(α 是奇异性指数; $f(\alpha)$ 是多重分形谱。)

通性越好。由于碳酸盐岩储层溶蚀孔洞、裂缝空间分布具有自相似结构,生产数据呈非正态分布特征,井间渗透率大小和注水前后生产指标变化幅度成正比,可用多重分形谱定量描述邻近生产井指标变化程度^[18]。多重分形谱 $f(\alpha)$ 定义为具有相同奇异性指数 α 子集的Hausdorff维数,用配分函数 $\chi_q(\delta)$ 描述多重分形谱 $f(\alpha)$ 分布特征。

$$\chi_q(\delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} [P_i(\delta) \sim \delta^{\tau(q)}] \quad (1)$$

式中: $N(\delta)$ 表示分形个数; $P_i(\delta)$ 为第 i 个分形窗口的概率测度。

$\tau(q)$ 是质量指数,定义如下:

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\ln \chi_q(\delta) / \ln \delta \right] \quad (2)$$

参数 q 和 $\tau(q)$ 经过勒让德变换计算得到。输入生产数据计算多重分形谱宽以反映概率测度分布的非均匀程度。当注水井的邻井生产曲线变化剧烈、响应明显时,多重分形谱的谱宽较大;当邻井生产曲线变化平缓、响应不明显时,多重分形谱的谱宽较小。研究通过分析井点间的压力、产量的变化,用多重分形细致刻画持续注水后邻近生产井指标变化程度,以定量描述井间流动能力,特征提取过程见图2。进一步基于滑动窗口提取最大波动等特征采用模糊综合评价方法建立定量评价模型,根据计算得到的综合连通系数相对大小量化表征连通程度。

1.3 基于地震多属性融合的三维连通路程强化学习搜索

针对超深层碳酸盐岩不同岩溶缝洞系统,预测井间三维连通路程空间展布特征,直观表征缝-洞、洞-洞、井-洞的空间配置关系是连通评价的基础。连通路程预测主要包括:基于深度学习地震多属性非线性融合、基于强化学习的最优连通路程搜索和井间多连通路程智能多目标优化3项技术。

1.3.1 基于深度残差网络的地震多属性非线性融合

地震多属性数据描述了不同尺度储集空间分布,如相干技术刻画大尺度裂缝、均方根振幅(RMS)技术描述溶洞,曲率检测中小尺度裂缝与微缝隙。为增强同相轴的横向连续性、强化边界特征,需进一步融合地震多属性。传统模型驱动的多信息融合技术存在构建先验约束不全面、正则化参数敏感等问题,随着深度学习技术的发展,数据驱动融合非线性建模能力更强^[19]。

研究基于相干、RMS等地震属性,基于有监督的深度残差网络构建空间特征提取模块获取孔、缝和洞的局部结构特征,以精细刻画储层孔、缝和洞的展布规律,网络结构如图3所示。地震属性融合网络构建主要包括特征提取和地震属性重构两部分。特征提取网络由两个连续的卷积层组成,设计参数校正线性单元和下采样层,用步长为2的卷积核进行下采样,并拼接提取特征图。为融合特征重构地震多属性图像,研究采用反卷积对特征图进行上采样,以恢复属性切片数据的细节和精细特征,在编码器和解码器之间建立跳跃连接,各上采样后将编码器的特征映射到解码器并与相应的特征图进行拼接,恢复降采样过程丢失的细节。深度残差网络融合模块对地震多属性进行特征融合,新融合属性刻画缝洞体边界更为清晰。

1.3.2 基于强化学习的最优连通路径搜索

碳酸盐岩油藏复合介质空间尺度差异大、不连续,各向异性,孔缝洞结构使得三维连通路径搜索环境复杂,搜索效率大幅度降低^[20]。研究将井间三维连通道搜索过程视为马尔可夫决策过程,将三维地震体中的碳酸盐岩复合介质多相流视为强化学习智能体,以

多属性融合后的三维地震体作为搜索环境,采用Q-Learning强化学习实现油藏注采井间三维路径的自动搜索^[21]。由于缝洞型油藏流体在裂缝、溶洞流动中往往沿渗透率大的方向流动,依据流体流动规律结合启发式思想设计新的奖励函数,提高连通路径搜索效率。

1.3.3 井间三维连通路径多目标优化

深部断裂带、暗河是缝洞型油藏主要流动通道,降压梯度大、流速高,注入水往往沿着高渗透带窜进,生产指标短期变化剧烈;溶洞为主要储集空间,通过溶洞连通的路径体积较大,洞内流体容积足够平衡压力波动,短期内生产指标变化不显著。因此井间存在多条沟通能力不一的连通路径,既有沿大尺度裂缝沟通、突破时间较短的通道,又有通过溶洞弥散扩散速度较慢、流通体积较大的途径,为典型的多约束多目标优化问题^[22]。井间多连通路径搜索考虑最短连通路径、最大流通体积等优化目标,具体设计如下。

1) 基于最短路径长度的优化目标 f_1

路径长度表示注采井间途经节点连通道距离总和。定义如下:

$$f_1 = \sum_{i=0}^{len-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (3)$$

式中: len 表示路径节点数量; x_i, y_i, z_i 为路径途经状态位节点的坐标。

2) 基于最大流通体积的优化目标 f_2

溶洞占比表示连通道中储层为溶洞的节点占路径总节点数的比例。定义如下:

$$f_2 = \frac{1}{len} \sum_{i=0}^{len} C(s_i) \quad (4)$$

式中: C 为溶洞节点的数量; s_i 为路径中属于溶洞的状态

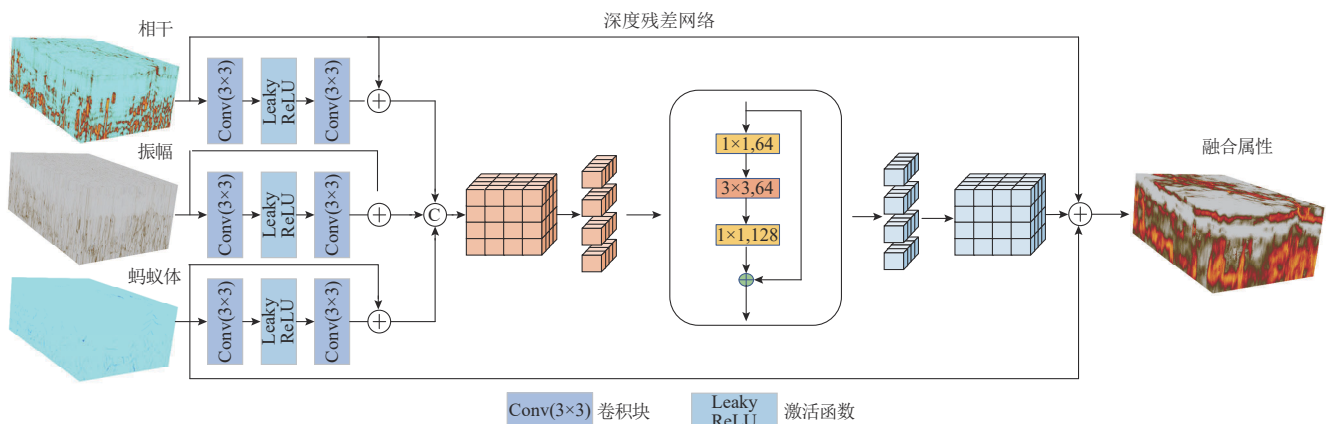


图3 深度学习融合网络结构图

Fig. 3 The structure diagram of deep learning fusion network

态位。

如何自动优化地震多属性描述的不同储集体阈值等参数、反映实际地质构造特征是研究的关键。研究构建基于Q-Learning的NSGA III井间三维连通路经多目标搜索算法,自动搜索路径、识别路径途经储集体类型,刻画连通通道的形态及三维空间展布,算法流程如图4所示。

将井间三维连通通道搜索过程视为马尔可夫决策过程(MDP) $\langle S, A, P, r, \gamma \rangle$ 。其中: S 表示状态集合; A 表示动作; $P = P(s'|s, a)$,是状态转移函数,表示在状态 s 下执行动作 a 后到达状态 s' 的概率; $r = r(s)$,是奖励函数,表示转移到状态 s 时所能获得的奖励期望; $\gamma \in (0, 1)$,是远期收益的折扣因子。策略选择函数可表示为 $\pi(a|s) = P(A = a|S = s)$,表示状态为 s 时采取动作 a 的概率。 Q 表用于存储状态 s 下执行动作 a 时累计预计的奖励 $Q(s, a)$ 。

2 不同岩溶背景井间连通路经预测

受古地貌、古水系和深大断裂作用,碳酸盐岩缝洞型油藏形成具有不同地貌分布特征的岩溶系统,主要包括剥蚀作用形成的风化壳岩溶、断裂控制的断控型岩溶和古水系控制的古暗河岩溶,不同的岩溶系统呈分区、分带分布特征,对应不同的缝洞空间配置关系和连通特征^[23]。采用论文提出的井间连通程度自动评价技术,系统分析不同岩溶背景典型缝洞单元的三维连通通道空间展布形态及生产动态响应特征。

2.1 风化壳岩溶连通特征

风化壳型岩溶系统主要分布在岩溶高地,在长期构造作用下由于抬升和风化剥蚀作用形成不整合面,发育在表层岩溶带风化面以下0~60 m内^[24]。受表生岩溶作用影响,储集空间以表层网状断裂及沿着裂缝局部溶蚀扩大形成的溶蚀孔洞为主,局部小型岩溶洞穴发育,密集发育的中小尺度断裂和岩溶管道是主要连通通道。

以实际缝洞单元为例,融合相干、振幅、蚂蚁体等地震多属性,采用强化学习自动搜索部分井组三维连通通道,其二维投影如图5所示。受控于古地貌,岩溶水顺缝而流,单元裂缝溶蚀明显,形成多个局部表层岩溶缝洞系统。风化壳岩溶井间连通通道范围大,多向连通,整体沿风化壳层呈不规则分布形态。

其中TK617CH井组自动搜索的井组三维连通通道如图6所示。图6a二维投影图显示井间通过不规则网状裂缝沟通,网状裂缝间分布溶蚀作用形成的小规模密集分布溶蚀孔洞。由图6b可知TK609和TK629井周较大溶洞发育,大溶洞间通过多条裂缝沟通。TK617CH井组呈多连通通道结构,裂缝网络是连片分布的关键,纵向上多为表层洞-缝-洞连通模式。

进一步采用多重分形、模糊综合评价等技术判断TK617CH井组注水期间各生产井生产动态变化情况,自动计算的波动程度、最大波动和连通系数如表1所示。TK617CH井与TK608,TK609,TK629等3口井连通,判断连通程度TK609>TK608>TK629。TK617CH

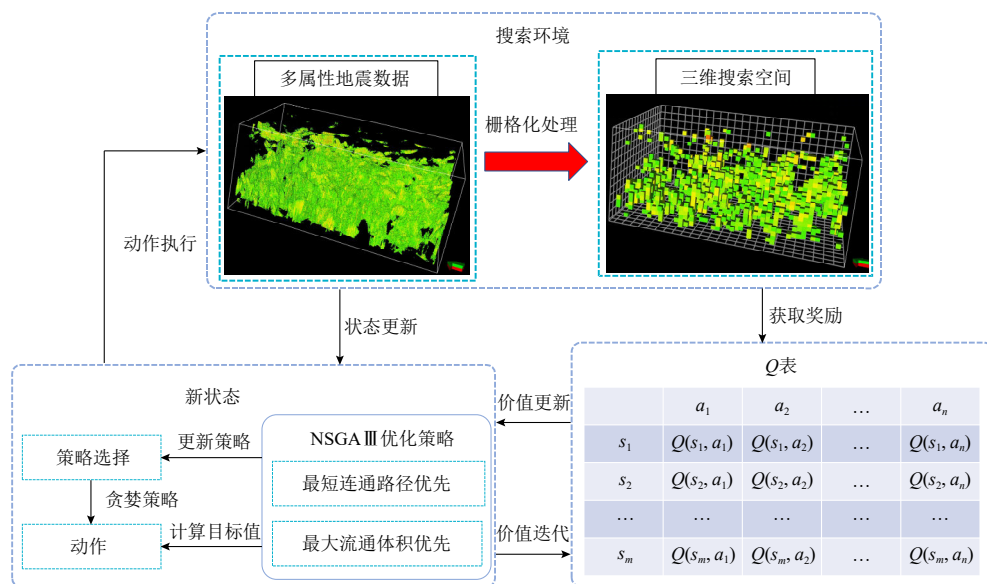


图4 Q-Learning井间三维连通路经多目标搜索流程图

Fig. 4 The multi-objective search process of Q-Learning 3D connected path between wells

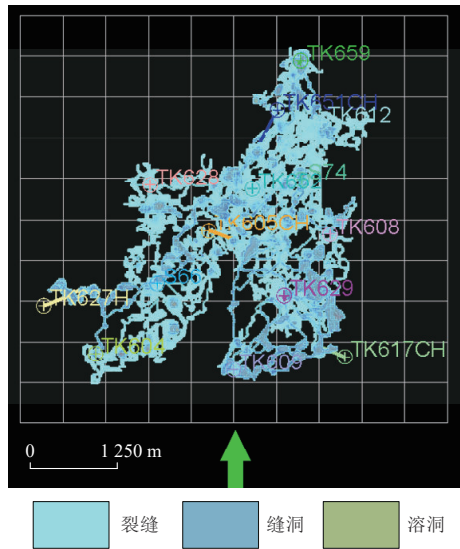


图5 塔里木盆地奥陶系风化壳岩溶典型单元三维连通通道投影图

Fig. 5 Three-dimensional connected channel projection of a typical unit of the Ordovician weathering crust karst, Tarim Basin

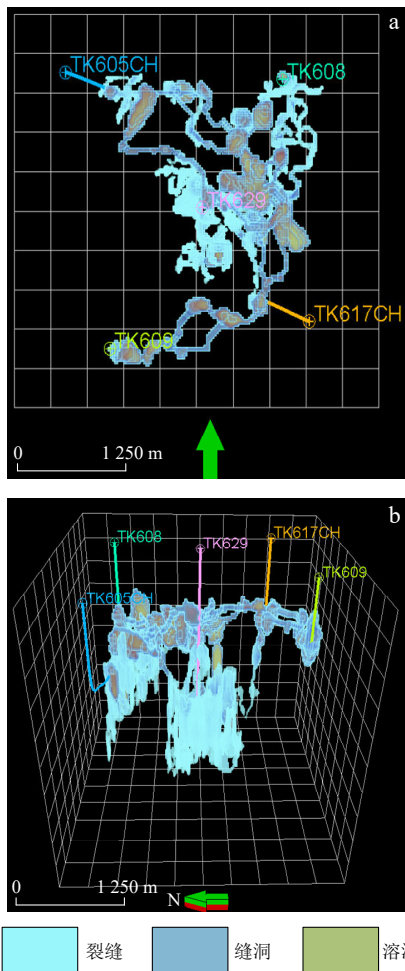


图6 塔河油田TK617CH井组三维连通通道

Fig. 6 Three-dimensional connected channel of TK617CH well group, Tahe oilfield
a. 平面展布图; b. 三维连通图

表 1 塔河油田 TK617CH 井组连通特征参数

Table 1 The characteristic parameter table of TK617CH well group connectivity

特征参数	井对		
	TK617CH- TK609	TK617CH- TK608	TK617CH- TK629
生产数据波动程度	2.206	2.005	1.038
生产数据最大波动	57.48	50.68	27.25
综合连通系数	0.359	0.301	0.140
示踪剂突破时间/cd	8.0	8.3	25.0
示踪剂峰值浓度/cd	497.30	180.60	156.40
劈分系数	0.398	0.301	0.101

井组同期注入示踪剂,示踪剂测试的突破时间、示踪剂峰值浓度和劈分系数等参数也反映了相同的连通关系与连通程度。以 TK608 生产井为例,其浓度产出曲线呈多峰形态,尖峰个数表征流体在储层沟通通道数目,反映多通道连通模式见图 7。井间连通路径与生产动态响应、示踪剂测试结果吻合,共同反映风化壳多通道网状裂缝连通模式。

2.2 断控岩溶连通特征

断控型岩溶受控于多期构造运动形成的深大断裂,经溶蚀和热液改造形成的条带状油藏^[25]。断裂带内部发育张扭段、压扭段和平移段缝洞体,弱张扭段、强压扭段、弱压扭段是油气富集区。

选取典型断控岩溶缝洞单元为研究对象,对 TH10348,TH10337,TH10328 和 T728CH 等 4 个井组采用算法自动搜索三维连通通道,通道二维投影如图 8 所示。连通通道整体明显呈条带状分布特征,通道上半段主要沿北北东方向 TP12CX 深大断裂带沟通,下半段走向与北北西方向 S86-S99 深大断裂平行的次级断裂方向一致。

TH10328-TH10323X 井间自动搜索的连通通道主体沿北北东方向展布,基本和 TP12CX 大断裂带发育方向一致(图 9)。TH10328 井注水后,注入流体沿断裂驱替,TH10323X 井受效后含水率快速上升,注采响应显著,动态响应特征见表 2。同期投放示踪剂,10 d 突破,12 d 见峰值,峰值浓度是背景值 6.5 倍,为典型大尺度断裂沟通特征。

TH10348-TH10364CH 井间自动搜索连通通道整体呈 U 型管状为缝-洞-缝连通模式(图 10)。该井对位于两大断裂带交汇区,压扭应力形成断隆带,储集体分布受断裂控制,TH10364CH 井周裂缝发育,流体沿高角度裂缝垂向溶蚀在 TH10348 井底形成大溶洞。

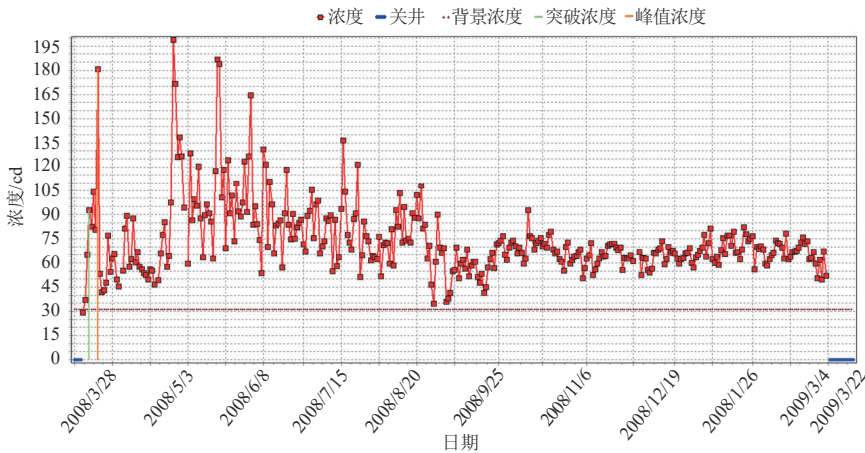


图7 塔河油田TK617CH-TK608井对示踪剂浓度曲线
Fig. 7 The tracer concentration curve of TK617CH-TK608 well pair, Tahe oilfield

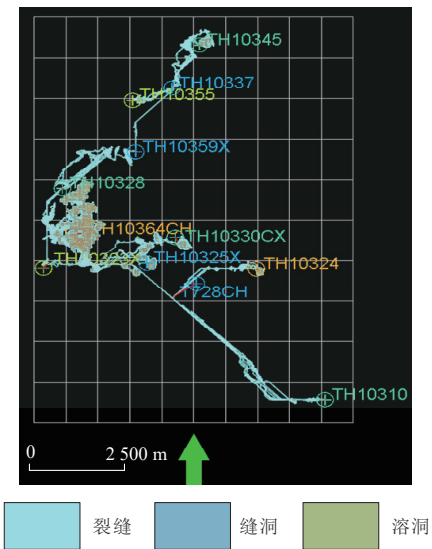


图8 塔河油田奥陶系断控岩溶典型单元三维连通通道投影图
Fig. 8 Three-dimensional connected channel projection of a typical unit of the Ordovician fault-controlled karst in Tarim Basin

水驱过程沿缝洞体先垂向后横向,通过高角度裂缝与底部大溶洞沟通,如图中红色箭头所示。TH10348井连续注水,注水后TH10364CH井受效,日产油、含水率缓慢上升。同期投放示踪剂,17 d突破,18 d见峰值,峰值浓度211.4 cd,峰值浓度约为背景值114.9 cd的2倍,呈典型局部弥散扩散溶洞沟通特征。

典型断控型缝洞单元连通通道整体受断裂及构造综合控制,与注采响应、示踪剂测试等动态特征吻合。

2.3 古暗河岩溶连通特征

古暗河型岩溶系统是长期径流溶蚀作用形成的地下河道,距风化面往下60~220 m,包括表层风化淋漓带和深层暗河溶洞带。表层风化淋漓带储层多为溶蚀

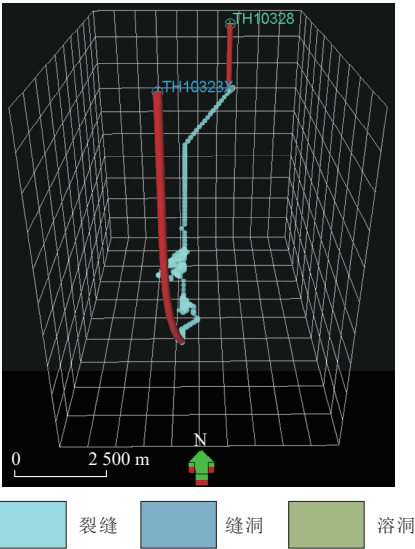


图9 塔河油田TH10328-TH10323X井对三维连通通道
Fig. 9 Three-dimensional connected channel of TH10328-TH10323X well pair in Tahe oilfield

表2 塔河油田动态特征参数
Table 2 The parameter table of dynamic characteristics for Tahe oilfield

特征参数	井对	
	TH10328-TH10323X	TH10348-TH10364CH
生产数据波动程度	1.600	0.428
生产数据最大波动	82.60	24.58
示踪剂突破时间/d	10(去掉关井时间)	17
示踪剂峰值时间/d	12(去掉关井时间)	18
示踪剂峰值浓度/cd	891.2	211.4

孔缝、大洞穴,深层暗河溶洞带以较大规模溶洞为主,井间连通多沿主河道、支流河道展布^[26-27]。

实际缝洞某单元发育有浅层和深部暗河,局部段

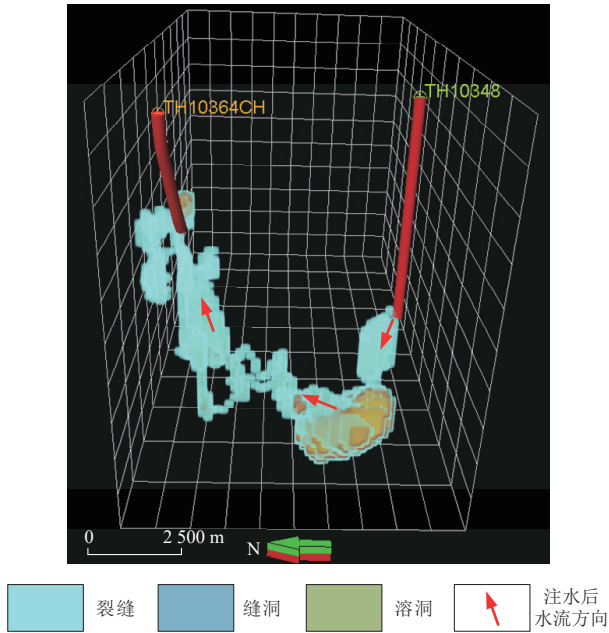


图10 塔河油田TH10348-TH10364CH井对连通通道

Fig. 10 Connected channel of TH10348-TH10364CH well pair in Tahe oilfield

通过高角度裂缝沟通浅层与深部暗河^[28-29],用算法自动搜索单元部分井组三维连通通道,其二维投影如图11所示。由图11可见连通沿暗河各干流、支流呈条带状展布,通道上分布较大规模溶洞,通道整体延伸较广、连续性较强。

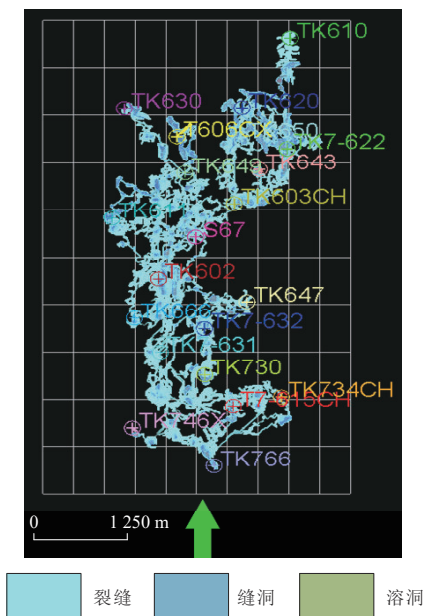


图11 塔里木盆地奥陶系古暗河岩溶典型单元三维连通通道投影图

Fig. 11 Three-dimensional connected channel projection of a typical unit of Ordovician ancient underground river karst, Tarim Basin

以单元TK603CH井组为例,自动搜索三维连通通道如图12所示。由于存在垮塌、充填,连通路径平面上呈现分段性特征(图12a),TK603CH井和TK643井位于单元浅层暗河上半段,S67井、TK602井和TK666井位于暗河下半段。沿浅层暗河发育大片连续溶洞,溶洞通过高角度裂缝沟通,纵向呈分层特征(图12b)。其中S67井和TK603CH井沿浅层暗河发育支流洞,TK602沿浅层暗河发育厅堂洞,沿深层暗河发育小规模溶洞。综上所述,位于古暗河岩溶的TK603CH井组,识别通道沿暗河呈分段条带分布形态,通道上连片分布各类厅堂洞、支流洞;纵向上呈分层模式,深浅层暗河不同规模溶洞通过高角度裂缝连通。

以TK603CH-S67井对为例分析注水期间动态响应特征。如表3所示,TK603CH井于2008年11月10日持续注水,注水后S67井日产油与含水率均缓慢上升,同期投放示踪剂,突破浓度较低,是背景浓

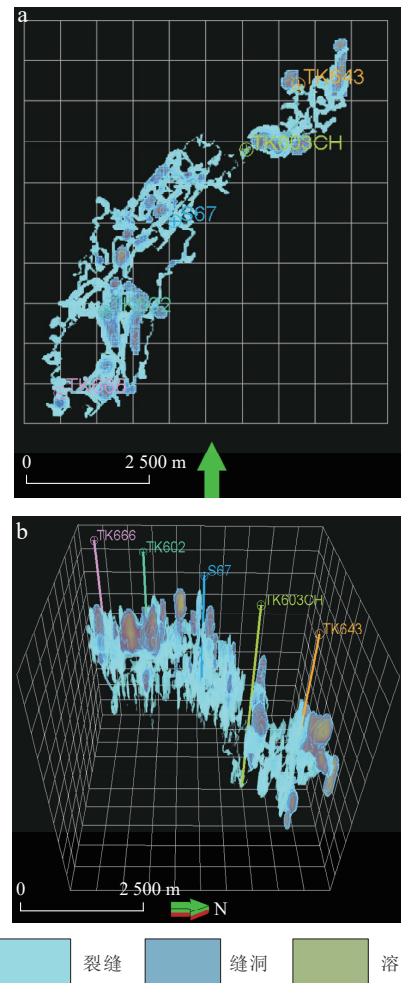


图12 塔河油田TK603CH井组三维连通通道

Fig. 12 Three-dimensional connected channel TK603CH well pair, Tahe oilfield

a. 平面展布图;b. 三维连通图

表3 塔河油田 TK603CH-S67 井组动态特征参数

Table 3 Dynamic characteristic parameters of TK603CH-S67 well pair, Tahe Oilfield

生产数据特征			示踪剂特征		
波动程度	最大波动	突破时间/d	峰值时间/d	背景浓度/cd	突破浓度/cd
0.744	28.20	4	5	70.6	156.7

度的2.19倍,突破时间为4 d,为暗河通道快速沟通特征,动态评价结果与静态搜索路径储集体分布特征吻合。

3 结论

1) 风化壳岩溶缝洞连通范围广,多向连通性好,整体呈不规则面状展布,示踪剂浓度产出曲线呈多峰形态,静动态特征共同反映井对间多通道连通模式。

2) 断控岩溶连通通道以主干断裂和次级断裂为主,沿断裂呈条带状连通,注采受效方向单一。沿断裂沟通井对注采响应明显,示踪剂推进速度快、峰值浓度高;断裂带交汇区由于垂向溶蚀作用形成溶洞,连通通道通过高角度裂缝和底部大溶洞沟通,示踪剂见峰时间长,峰值浓度较低。

3) 古暗河岩溶主要沟通通道是不同尺度的河道,上下层河道通过高角度裂缝沟通,由于暗河充填与垮塌,平面呈分段性。井间示踪剂推进速度快,峰值浓度较低。

参 考 文 献

- [1] 康玉柱. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 1-12.
KANG Yuzhu. Characteristics and distribution laws of paleokarst hydrocarbon reservoirs in Palaeozoic carbonate formations in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 1-12.
- [2] 康志宏, 陈琳, 鲁新便, 等. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 110-120.
KANG Zhihong, CHEN Lin, LU Xinbian, et al. Fluid dynamic connectivity of karst carbonate reservoir with fracture & cave system in Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 110-120.
- [3] 杨敏. 塔河油田4区岩溶缝洞型碳酸盐岩储层井间连通性研究[J]. 新疆地质, 2004, 22(2): 196-199.
YANG Min. Interwell communication in dissolved fracture-cavity type carbonate reservoir at block 4 in the Tahe oil fields[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(2): 196-199.
- [4] HEFFER K J, FOX R J, MCGILL C A, et al. Novel techniques show links between reservoir flow directionality, earth stress, fault structure and geomechanical changes in mature waterfloods[J]. SPE Journal, 1997, 2(2): 91-98.
- [5] YOUSEF A A, GENTIL P, JENSEN J L, et al. A capacitance model to infer interwell connectivity from production- and injection-rate fluctuations[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2006, 9(6): 630-646.
- [6] LIU Feilong, MENDEL J M, NEJAD A M. Forecasting injector/producer relationships from production and injection rates using an extended Kalman filter[J]. SPE Journal, 2009, 14(4): 653-664.
- [7] 赵辉, 康志江, 张允, 等. 表征井间地层参数及油水动态的连通性计算方法[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 922-927.
ZHAO Hui, KANG Zhijiang, ZHANG Yun, et al. An interwell connectivity numerical method for geological parameter characterization and oil-water two-phase dynamic prediction[J]. Acta Petroli Sinica, 2014, 35(5): 922-927.
- [8] 李阳, 康志江, 薛兆杰, 等. 中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 669-678.
LI Yang, KANG Zhijiang, XUE Zhaojie, et al. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 669-678.
- [9] 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 Zhijiang, LI Yang, JI Bingyu, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 434-441.
- [10] 鲁新便, 赵敏, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维建模方法技术研究——以塔河奥陶系缝洞型油藏为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 193-198.
LU Xinbian, ZHAO Min, HU Xiangyang, et al. Studies of 3D reservoir modeling: Taking Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(2): 193-198.
- [11] 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. Modelling of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 59-66.
- [12] 康志江, 尚根华, 李红凯, 等. 中国碳酸盐岩缝洞型油藏认识不准确性及生产优化理论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020.
KANG Zhijiang, SHANG Genhua, LI Hongkai, et al. Inaccuracy of understanding and production optimization theory of carbonate fractured-vuggy reservoirs in China[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [13] 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 Xinrui, SUN Jianfang, WU Xingwei, 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.

- [14] 陈学华, 钟文丽, 贺振华. 基于时频域 Teager 主能量的储层检测[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 434-437.
CHEN Xuehua, ZHONG Wenli, HE Zhenhua. Reservoir characterization based on Teager dominant energy in time-frequency domain [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(3): 434-437.
- [15] 李小波, 李新华, 荣元帅, 等. 地震属性在塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏连通性分析及其注水开发中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 65-67, 71.
LI Xiaobo, LI Xinhua, RONG Yuanshuai, et al. The seismic attribute characterization of fracture-vug carbonate reservoir connectivity and its application in waterflood development [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 65-67, 71.
- [16] 康志江, 鲁新便, 张允. 碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率基础理论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020.
KANG Zhijiang, LU Xinbian, ZHANG Yun. Basic theory of enhanced oil recovery in fractured-vuggy carbonate reservoirs[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [17] 李阳, 康志江, 薛兆杰, 等. 碳酸盐岩深层油气开发技术助推我国石油工业快速发展[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(3): 33-42.
LI Yang, KANG Zhijiang, XUE Zhaojie, et al. Deep carbonate oil and gas development technology fuels China's petroleum industrial development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3): 33-42.
- [18] 张冬梅, 康志江, 陈小岛, 等. 缝洞型油藏井间连通程度定量评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020.
ZHANG Dongmei, KANG Zhijiang, CHEN Xiaodao, et al. Quantitative evaluation of connectivity between wells in fractured-vuggy reservoirs [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.
- [19] 刘花成, 任文琦, 王蕊, 等. 用于单幅模糊图像超分辨的 Transformer 融合网络[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(5): 1616-1631.
LIU Huacheng, REN Wenqi, WANG Rui, et al. A super-resolution Transformer fusion network for single blurred image[J]. Journal of Image and Graphics, 2022, 27(5): 1616-1631.
- [20] 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 Juan, YANG Min, XIE Runcheng, 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.
- [21] 毛国君, 顾世民. 改进的 Q-Learning 算法及其在路径规划中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(1): 91-97.
MAO Guojun, GU Shimin. An improved Q-Learning algorithm and its application in path planning [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(1): 91-97.
- [22] 郭兴海, 计明军, 张卫丹. 融合多目标与速度控制的 AGV 全局路径规划[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1369-1376.
GUO Xinghai, JI Mingjun, ZHANG Weidan. AGV global path planning integrating with the control of multi-objectives and speed [J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1369-1376.
- [23] 计秉玉, 郑松青, 顾浩. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术的认识与思考[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1459-1465.
JI Bingyu, ZHENG Songqing, GU Hao. On the development technology of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on Tahe oilfield and Shunbei oil and gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1459-1465.
- [24] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68.
HUANG Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68.
- [25] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 43-53.
HU Wenge. Paleokarst fracture-vug types and their reconstruction in buried hill area, Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43-53.
- [26] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268-274.
LU Xinbian, HE Chengjiang, DENG Guangxiao, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [27] 宋传真, 马翠玉. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏油水流动规律[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(4): 150-158.
SONG Chuazhen, MA Cuiyu. Oil-water flow law of Ordovician fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(4): 150-158.
- [28] 鲁新便, 荣元帅, 李小波, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏注采井网构建及开发意义——以塔河油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 658-664.
LU Xinbian, RONG Yuanshuai, LI Xiaobo, et al. Construction of injection-production well pattern in fractured-vuggy carbonate reservoir and its development significance: A case study from Tahe Oilfield in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 658-664.
- [29] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1466-1480.
ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1466-1480.

(编辑 张亚雄)