

碳酸盐岩缝洞型油藏古岩溶洞穴充填作用研究进展

——以塔河油田为例

高济元^{1,2}, 张恒^{1,2*}, 蔡忠贤^{1,2}, 李虎忠³, 王诺宇^{1,2}

1 中国地质大学(武汉)油气勘探开发理论与技术湖北省重点实验室, 武汉 430074

2 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074

3 中国石油集团西部钻探工程有限公司青海钻井公司, 海西 816499

* 通信作者, hzhang1219@cug.edu.cn

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2025-02-07

湖北省油气勘探开发理论与技术重点实验室开放基金(TTPED-2021-12)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA14010302)和中石化西北油田分公司科研项目(KY2021-S-094)联合资助

摘要 与岩溶相关的碳酸盐岩缝洞型油藏在全球油气田开发中占据重要地位, 尤其在深层—超深层条件下, 其内部结构和充填改造作用表现出高度复杂性。明确古岩溶洞穴中充填物类型及充填程度, 对储集空间有效性评价、开发策略优化及剩余油挖潜具有重要的理论和实际意义。本文在大量文献调研的基础上, 系统梳理了岩溶洞穴充填相和洞穴碎屑充填相划分的方案, 总结了洞穴内部充填结构地质认识的主要理论进展。通过调研古岩溶洞穴充填物识别与预测、充填程度判识的技术进展, 总结了目前塔河地区构建的岩溶洞穴充填模式。研究表明洞穴充填相的识别研究进展主要体现在: ①现代地表洞穴碎屑质充填相成因类型和古岩溶洞穴充填的划分; ②针对于洞穴充填物的识别与预测、洞穴充填程度的判别。早期采用的方法普遍为利用测井和地震资料的定性、半定量方法。随着人工智能技术的兴起, 利用机器学习强大的泛化能力进行充填物、充填程度的识别与预测成为该领域的前沿技术研发方向; 古岩溶洞穴充填模式建议在古岩溶缝洞系统的层次性结构框架内, 利用水文地貌与洞穴发育部位的耦合关系, 并结合实钻井揭示(或是采用预测手段)的洞穴内部充填物类型进行构建。在岩溶洞穴充填作用研究方面存在以下问题: ①古岩溶洞穴充填物类型的划分依据主要是岩石物理组分的差异, 而并没有体现充填物形成的动力学机制; ②针对洞穴充填物的识别精度不足, 导致无法完整地识别洞穴内部充填物序列; ③目前普遍利用地震反演技术得到的洞穴充填预测的结果只能对泥质含量进行预测, 无法对所有充填物充填程度进行准确评价, 因而古岩溶暗河网络充填程度空间差异分布预测仍待深入攻关。基于目前存在的问题, 本文认为利用人工智能技术开展洞穴充填物类型和充填程度的识别与预测是大势所趋。如何提高样本集的代表性、预测网络的准确性和泛化度是未来攻关的方向。

关键词 古岩溶洞穴; 大型岩溶暗河; 充填相; 充填程度; 中下奥陶统; 塔河油田

中图分类号: P618.13; P642.251

引用格式: 高济元, 张恒, 蔡忠贤, 李虎忠, 王诺宇. 碳酸盐岩缝洞型油藏古岩溶洞穴充填作用研究进展——以塔河油田为例[J]. 石油科学通报, 2025, 10(02): 326–341

GAO Jiyuan, ZHANG Heng, CAI Zhongxian, LI Huzhong, WANG Nuoyu. Research progress on the filling effect of paleokarst caves in carbonate fracture-cave reservoirs: A case study of Tahe Oilfield[J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(02): 326-341. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.006

Research progress on the filling effect of paleokarst caves in carbonate fracture-cave reservoirs: A case study of Tahe Oilfield

GAO Jiyan^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2}, CAI Zhongxian^{1,2}, LI Huzhong³, WANG Nuoyu^{1,2}

1 Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Exploration and Development Theory and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3 Qinghai Drilling Company, CNPC Xibu Drilling Engineering Co. Ltd., Haixi 816499, China

Received: 2024-09-12; Revised: 2025-02-07

Abstract Karst-related carbonate fracture-cavity reservoirs play a vital role in global oil and gas field development. Especially under deep to ultra-deep conditions, their internal structures and filling-modification processes exhibit extreme complexity. Identifying the types and degree of fillings in paleokarst caves carries significant theoretical and practical value for evaluating effective reservoir space, optimizing development strategies, and tapping remaining oil potential. Based on an extensive review of the literature, this study proposes a systematic classification scheme for the filling phases and detrital filling phases of karst caves, highlighting key advancements in the geological understanding of internal cave filling structures. The article summarizes the current models of karst cave filling in the Tahe Area, focusing on technological progress in identifying and predicting filling materials and determining the degree of filling in paleokarst caves. Progress in identifying cave filling facies is primarily reflected in the genetic classification of modern surface cave detrital filling facies and the categorization of paleokarst cave fillings. Early methods for identifying and predicting cave filling materials and assessing filling degrees relied on qualitative and semi-quantitative approaches using logging and seismic data. With the advent of artificial intelligence (AI) technology, the application of machine learning's powerful generalization capabilities to identify and predict filling materials and degrees has emerged as a cutting-edge research direction in this field. The classification of filling modes in paleokarst caves suggests utilizing the coupling relationship between hydrogeology and cave development within the hierarchical structure framework of the paleokarst fracture-cave system. This approach, combined with the types of internal filling materials revealed by actual drilling data, facilitates the construction of filling models. However, current classifications of filling types in paleokarst caves primarily focus on differences in rock physical components, without adequately reflecting the dynamic mechanisms of filling formation. Additionally, the accuracy of identifying cave fillings remains insufficient, hindering the comprehensive determination of the sequence of fillings within caves. Currently, seismic inversion technology, commonly used for predicting cave fillings, can only estimate mud content and fails to accurately evaluate the degree of filling for all materials. Consequently, predicting the spatial distribution of filling degrees in paleokarst underground river networks requires further research and development. In light of these challenges, this article argues that leveraging AI technology to identify and predict the types and degrees of cave filling materials represents a promising trend. Future research should focus on improving the representativeness of sample sets, as well as the accuracy and generalization capabilities of prediction networks.

Keywords paleokarst cave; large karst conduits; filling facies; filling degree; Lower-Middle Ordovician; Tahe Oilfield

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.006

0 引言

碳酸盐岩在全球广泛分布, 占全球沉积岩总面积的 20%, 分布于中东、北美、南美和亚洲等地区, 其蕴藏的油气储量占世界油气总储量的 52%, 这充分展示了碳酸盐岩油气藏巨大的油气勘探开发潜力^[1-3]。碳酸盐岩油气藏储层类型多样, 大体可分为相控型和非相控型^[4]。其中, 塔里木盆地塔河油田就属于典型的非相控型岩溶缝洞型油气藏, 由于其独特的地质演化过程和丰富的油气资源, 被誉为“地质历史时期的

明珠”。

塔河油田是我国第一大下古生界海相碳酸盐岩缝洞型油田^[5-6], 其储集空间以不同尺度的岩溶缝洞结构为主, 包括表层岩溶缝洞、岩溶暗河和断控岩溶缝洞^[7-9]。其中, 奥陶系大型古岩溶暗河、孤立洞穴是该区最为典型的油气储集体, 具有重要的油气勘探与开发价值^[10-12]。

然而, 受到岩溶水文地貌差异演化的影响, 古岩溶洞穴埋藏深度深、发育规模大、分布范围广, 平面形态多样、垂向分层发育、洞道样式丰富^[13-17]。同时,

由于多期构造作用和不同类型古岩溶作用的叠加改造^[18-20],古岩溶洞穴内部普遍发生了不同程度的充填、垮塌和错断^[21-24]。这些改造作用使得岩溶洞穴内部结构异常复杂、具有极强的非均质性,严重制约了缝洞型储层的勘探开发进程。

基于现代岩溶洞穴野外观测、建立岩溶洞穴的结构样式^[25],并详细描述、精确识别古岩溶洞穴内部结构^[7,26-29],是目前开展塔河油田古岩溶缝洞储集体精细表征的核心内容,也是揭示有效缝洞空间发育与分布特征、进而推动剩余油挖潜的关键环节。

作为油气勘探开发的前沿领域,深层-超深层碳酸盐岩缝洞型油藏的内部结构和充填改造作用呈现出高度的复杂性,同时也是理解碳酸盐岩缝洞型储层形成的关键和科学问题。从全球角度来看,碳酸盐岩缝洞型油藏广泛分布于世界主要含油气盆地,其内部充填物的充填类型和模式反映了不同地质背景下的构造活动、古气候变化、储层演化机制及流体运移特征。例如美国二叠盆地 Ellenburger 群下奥陶统白云岩顶部形成风化淋滤作用带,成为重要的油气储层相带,与塔河油田具有可对比性。塔河油田作为塔里木盆地深层-超深层碳酸盐岩缝洞型油藏的典型代表,其奥陶系顶部经历了多期构造运动与岩溶作用的强烈改造,古岩溶洞穴内部充填物不仅有与表生岩溶相关的大气淡水淋滤作用相关产物,也存在与深成岩溶相关的地层深部热液作用相关产物,改造类型复杂多样,是研究古岩溶作用不可多得的天然实验室。以塔河油田作为研究案例,有助于构建全球性、普适性的深层-超深层碳酸盐岩缝洞型油藏古岩溶洞穴充填作用理论框架,为全球类似油气田勘探和开发提供科学指导和技术支持。

1 岩溶洞穴充填相研究进展

1.1 现代地表洞穴碎屑充填相划分方案

洞穴碎屑质充填物的划分是洞穴充填相研究的一个分支。早期的研究仅将洞穴碎屑质沉积物作为沉积岩的一种特殊类型,着重强调洞穴地层学和沉积物的来源分析。自 20 世纪 60 年代初召开化学和碎屑质沉积物国际年会以来,洞穴充填物被正式纳入洞穴学研究范畴^[30]。随着国外洞穴学家研究不断深入,80 年代开始针对洞穴沉积物相继提出了多种划分方案:有 Ford 和 Williams^[31]、Gillieson^[32]、Springer 和 Kite^[33]、Bosch 和 White^[34]、White^[35]。但正如 White 所指出的那样,目前尚没有一个能被普遍接受的分类方案,反映

出在洞穴沉积物研究的一些基本问题上目前仍然存在一定分歧。White 在综合前人分类基础上提出的一个折中方案,在早年具有较大的影响力。随后, Springer 在综合 White 分类基础上提出的方案得到了业内学者专家的认可,得到了广泛的实际运用。多数学者主张将碎屑质沉积物源于洞内还是洞外分成两大类:自源型沉积和异(外)源型沉积,然后再进行细分(表 1)。

在 Springer^[33]的分类中,重力相类指的是通过重力而不是流体流动搬运的沉积物或块体,其中的垮塌沉积主要由洞顶、洞壁和入口地区崩落的块体组成;渗滤沉积主要是由重力通过不连续近垂直的路径搬运的碎屑颗粒组成。残留相类是指原始或次生沉积经风化作用而形成的沉积物。河流相类是指通过水流搬运的碎屑沉积物,其中的层载沉积主要由河流底部流动牵引力搬运组成的颗粒组成,缓流沉积由悬浮或沉积洪泛水携带的颗粒组成,静水沉积主要由悬浮携带的或停滞水体中沉积的颗粒组成,块体流沉积主要由洪泛水(滑动层)或碎屑流作为半粘性单元搬运碎屑颗粒组成。可以看出,该分类强调主要搬运机理的不同。

与 Bosch 和 White^[34]的分类相比, Springer 的分类多了静水沉积,少了河道相,另外其残积相相当于后者的残积相和重力相的总和。与 White 分类的主要区别在于对河流搬运沉积的细分,前者强调的是搬运机理,后者考虑的是物源成分。显然从理解洞穴水动力角度看, Bosch 和 White 或 Springer 的划分更为合理。

上述这些学者的分类方案中,一个共同的特点是:在分类思想上普遍强调相的概念,即分类并不是单纯对洞穴沉积充填岩类的划分,而是对洞穴沉积成因组合的划分,因此目前的这些分类实际上是洞穴沉积充填相的划分方案。这种划分思想的优点在于可以通过对洞内碎屑质沉积相类型的确定,分析洞道不同部位的水动力条件,建立洞道类型与水动力特征的对应关系。这种将洞穴沉积成因类型划分的思想对后续古岩溶洞穴充填物的划分起到了很大的启示作用。

1.2 古岩溶洞穴充填相划分方案

1.2.1 Loucks 分类方案

为了确定古洞穴型储层的几何形状、规模、孔隙网络和空间的复杂性, Loucks 通过现代洞穴系统(阿肯色州北部的布朗夏尔泉洞和恩尼斯洞、肯塔基州的猛犸/弗林特山脊洞穴系统、得克萨斯州中部的长角牛洞穴和内太空洞)和古代洞穴系统(得克萨斯州西部下奥陶统和志留-泥盆系地层中的多个油气田,以及得克萨斯州中部下奥陶统古岩溶地层的露头)的考察,

建立了古洞穴储层的地质模型。将洞穴充填物分为裂纹化角砾、混杂角砾岩与洞穴沉积充填3类，形成著名的三角分类图^[36]。

如图1所示，裂纹化角砾是高度破碎的岩石，裂缝将不同的角砾碎屑分隔，当角砾碎屑之间间隔增大时，一些碎屑旋转明显，逐渐从镶嵌状角砾变为混杂的角砾。混杂角砾岩以广泛的碎屑旋转和位移为特征，其碎屑可以来自几种来源，产生一种复成分角砾岩。杂乱角砾岩随着基质支撑的增加，逐渐从碎屑为主变为沉积为主，形成洞穴沉积充填物。Loucks的洞穴充填物三角分类方案对后期学者产生了深远的影响。

1.2.2 张美良和肖玉茹分类方案

2000—2003年，张美良和肖玉茹提出了不同的划分方案，但划分依据均是围绕洞穴沉(堆)积物的物质成分、沉积堆积环境以及形态组合特征进行的。张美良在荔波的岩溶地区，将洞穴沉积划分为化学沉(淀)积、流水机械沉积和洞穴崩塌堆积等3大类^[37]。这种分类方案高度概括了现代地表岩溶暗河中洞穴充填物类型，对古岩溶洞穴充填相划分具有重要意义。肖玉茹在塔河油田古洞穴型碳酸盐岩储层的研究中进一步细化了洞穴充填相，明确了洞穴充填相的内涵。将洞

穴充填相划分：洞穴塌陷角砾岩；暗河沉积的灰质砂砾岩、灰质砂岩、灰质粉砂岩和灰质泥岩；溶积泥岩和泥质粉砂岩；溶积灰岩和溶积砂岩^[38]。肖玉茹的分类方案从物质成分角度出发，区分砂、泥和灰岩，同时考虑沉积物成因，丰富了充填物种类，但仍然没有脱离张美良划分方案的思想。

1.2.3 徐微、蔡忠贤分类方案

2010年，徐微和蔡忠贤从油田生产实际出发，通过岩芯观察，在前人研究的基础上将塔河古溶洞相分为6类：洞穴外流水机械沉积相(洞穴外的流水机械沉积)、围岩相(未干扰围岩相、裂纹化围岩相、高裂纹化围岩相)(图2a~b)、渗流充填相(分布在高裂纹化围岩相与细碎屑角砾岩相之间，无层理构造，大部分为地表风化残积物质)(图2c)、垮塌型角砾岩相(粗碎屑角砾岩相、细碎屑角砾岩相)(图2d~e)、搬运型岩相(搬运型砾岩相、搬运型砂岩相)(图2f~g)、化学沉(淀)积岩相(滴水类和流石类化学沉淀)(图2i)^[18]。这套分类方案吸收了国内外野外露头 and 古岩溶洞穴充填物类型划分的成果，较为完整的总结了塔河地区洞穴取芯井的观察结果，具有较好的理论和应用价值，被后人广泛使用。

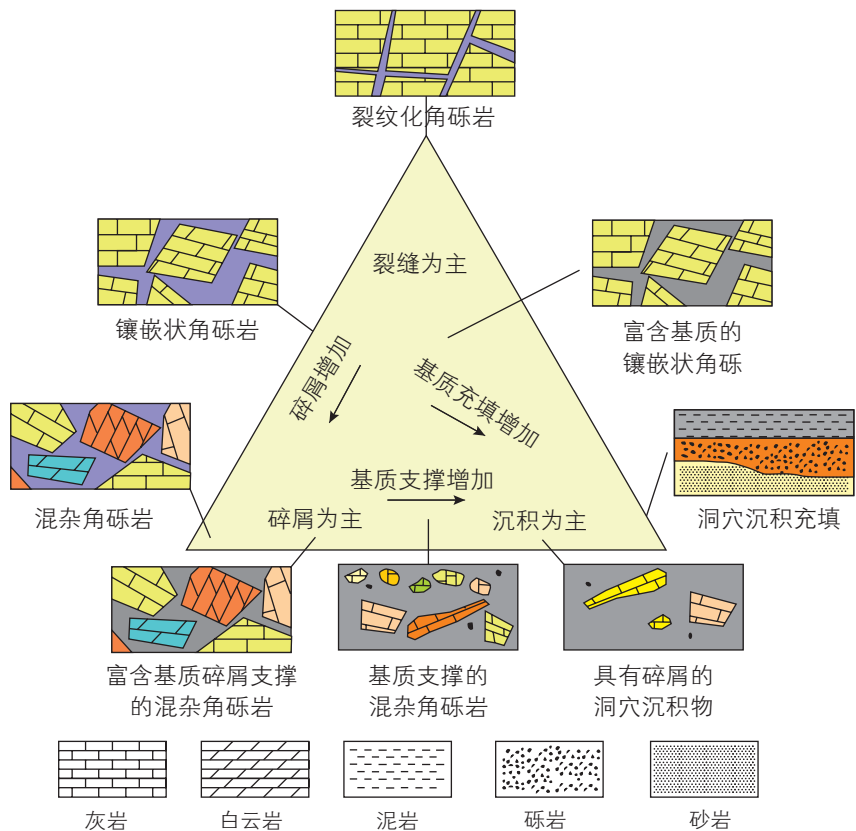


图1 洞穴充填物三角分类方案(据文献[36]修编)

Fig. 1 Triangle classification scheme for cave filling materials (revised from reference[36])

由此可见，从目前采集到的岩芯资料以及现代地表考察结果，对于古岩溶洞穴充填相的识别已经有了丰富的成果(表 1)，充填物类型完善，成因分类合理，这为后续洞穴充填相测井识别与预测打下了坚实的基础。

1.3 洞穴充填序列

古溶洞充填序列可以反映溶洞系统形成的地质作用过程，因此可以通过对洞穴充填物垂向叠置序列的研究，来反演洞穴形成的阶段性，追索其发育演化历史。

关于洞穴充填序列，国外学者 Kerans^[39]曾提出洞穴相理想层序，自上而下：裂纹化的洞顶角砾、由碎

屑和其他沉积物组成的洞穴充填相和杂乱堆积的垮塌相。Loucks^[36]以其建立的洞穴体系角砾和碎屑沉积的三角分类为基础，对美国二叠盆地下奥陶统岩溶提出了溶洞相模式，阐述了得克萨斯 Crane 县 31 区 ARCO1 井 W 单元下奥陶统 Ellenburger 群多个垮塌洞学体系中洞穴的充填序列，其自上而下分别为：洞穴顶部相(发生原地角砾岩化、形成裂缝角砾岩、镶嵌角砾岩)、洞穴充填相与下部垮塌相，其中溶洞顶部相和下部垮塌相对油气储集十分有利。在国内缝洞型油藏实际生产开发的过程中，众多学者对连续取芯的洞穴井 T615、T403 的洞穴充填序列进行了研究^[40-42]。

由于取芯井工程成本高、洞穴井取芯困难等原因，导致能完整揭示洞穴内部充填垂向序列的井非常稀少，



(a)T403 井, 7(1/44), 5504.4 m, 灰色亮晶砂屑灰岩, 未干扰围岩相; (b)T403 井, 6(22/36), 5487.4 m, 高角度裂缝, 缝内充填灰绿色砂泥, 裂纹化围岩相; (c)T403 井, 6(28/36), 5488.8 m, 灰色亮晶砂屑灰岩伴生方解石和灰绿色砂泥质, 渗流充填相; (d)T615 井, 7(4/35), 5521.6 m, 被灰绿色砂泥质胶结的细碎屑角砾岩, 角砾岩相; (e)T615 井, 11(27/36), 5559.2 m, 见高角度裂缝, 缝内被灰绿色砂泥质胶结粗碎屑角砾岩, 角砾岩相; (f)T403 井, 8(34/44), 5541.1 m, 见磨圆度较好的砾石, 灰绿色砂泥质胶结的角砾, 搬运型砾岩相; (g)T615, 9(13/74), 5542.7 m, 灰绿色石英砂, 搬运型砂岩相; (h) S75, 8(5/44), 5582.4m, 灰色亮晶方解石, 缝壁见巨晶方解石, 化学沉积岩相; (i)S65, 5732.7 m, 17(4/7), 巨晶方解石胶结角砾岩, 化学沉积岩相

图 2 塔河油田奥陶系岩溶洞穴充填物类型与特征

Fig. 2 Types and characteristics of filling materials in Ordovician palaeokarst caves in Tahe Oilfield

表 1 古岩溶洞穴充填相划分方案与洞穴碎屑质沉积物划分方案对比

Table 1 Comparison of classification schemes for filling facies of paleokarst caves and cave clastic sediments

类型	古岩溶洞穴充填相划分方案			洞穴碎屑质沉积物划分方案		
	Loucks ^[36]	张美良 ^[37] ；肖玉茹 ^[38]	徐微，蔡忠贤，修编 ^[18]	White ^[35]	Bosch，White ^[34]	Springer ^[33]
沉积物来源	自源沉积	裂纹角砾	围岩相(未干扰围岩相、裂纹化围岩相、高裂纹化围岩相)			
		重力崩塌堆积(洞穴塌陷角砾岩)	垮塌型角砾岩相(粗碎屑角砾岩相、细碎屑角砾岩相)	风化碎屑 破裂碎屑		重力相类(垮塌碎屑、渗透沉积)
		化学沉积(淀)(溶积灰岩)	化学沉积(淀)岩相(滴水类和流石类化学沉淀)		残积相	残留相类
	异源沉积	流水机械沉积(灰质砂砾岩、灰质粉砂岩、灰质泥岩、溶积泥岩、泥质粉砂岩、溶积砂岩)	搬运型岩相(搬运型砾岩相、搬运型砂岩相、搬运砂质泥岩相)	河流搬运沉积(冲进的有机物、冲积物、冲进的冰川物、火山物)	河道相 密度流相/重力流相 河道滞留相 漫滩相	河流相类(层载、缓流、静水、块体运动)
			渗流充填相	洞口倒石堆 渗流沉积		

连续取芯的更是凤毛麟角^[43]，因此，塔河油田主体区 T615 井是研究洞穴充填序列的绝佳例子。如图 3 建立的洞穴内部充填序列所示，整个洞穴可以划分成底洞发育段、主洞段和洞顶段 3 个段，底洞段由 3 个不同深度的小洞组成，主洞从主要为机械流水沉积充填，洞顶段主要由垮塌作用组成。每一个完整的序列自下而上由流水机械沉积—垮塌角砾—裂纹化围岩构成。底洞基本上由单一序列构成，主洞中的充填可以细分成两个序列，反映出自主洞被机械流水沉积充填后又经历了 3 次明显的垮塌作用。此外，陈轩在对 T615 井洞穴充填序列研究的基础上，利用稀土元素分配模式及自生伊利石 K-Ar 测年对其年代进行了鉴定，认为洞穴内灰绿色搬运和渗流充填物应该与巴楚组沉积时期的海侵作用相关，杂色砾岩主要为加里东末期岩溶洞穴内搬运作用的产物^[44]。这种对于洞穴内部充填物序列的识别与地质历史的重构，不仅可以帮助学者理解塔河油田缝洞结构的形成过程，更有助于构建洞穴型储层的有利储集空间发育模式。

2 古岩溶洞穴充填物识别与预测

古岩溶洞穴充填物种类多样且复杂，不同的充填物孔隙度、渗透率差异性巨大，某些充填物甚至可以

直接作为油气储层(如 T615 井发现的石英砂岩充填物)，这种极强的非均质性直接影响了洞穴型储层的储集物性。因此国内外学者基于露头、岩芯、钻测井数据、成像测井图像、地震或者物理模型实验等资料识别洞穴充填物，进而预测充填物类型，这对储层的开发具有重要的实际生产意义。

2.1 岩芯、露头手段

由 1.2 节中洞穴充填相划分方案可知，国内外学者在上个世纪到这个世纪初通过观察岩芯和野外露头剖面的方法，对古岩溶洞穴充填物识别进行了大量的工作，并进行了详细的识别与分类。划分结果较为全面，基本囊括了目前岩芯看到的所有种类。

2.2 测井手段

由于测井数据成本较低，获取相对容易，且数字资料丰富，使得更多学者倾向于使用测井数据进行洞穴充填物的识别工作。

目前常用的测井采集的数据，根据原理的不同，大多通过不同物质的岩石物理性质来进行区分，包括密度、孔隙度、电阻率、放射性等，因此不同充填物的洞穴在常规测井电性特征以及成像测井图上有明显差异^[45]。前人根据电测曲线半定量判断洞穴充填物类

型,当洞穴被泥岩充填时,自然伽马以及去铀伽马都很高,一般为 100~150 API; 深浅电阻率较低,一般小于 $20\ \Omega\cdot\text{m}$; 密度测井值较低,中子孔隙度较大,反映充填的砂、泥岩未被压实。当洞穴中充填角砾岩时,自然伽马位于正常泥岩和致密灰岩之间,一般为 15~60 API; 电阻率一般在 $3\sim70\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间^[42]。苏俊磊利用测井曲线资料,在前人的基础上进一步使用泥质含量(V_{sh})—浅侧向电阻率(R_{s})的交会图进行识别洞穴内未充填、机械沉积、重力崩塌和化学沉积相,根据

交汇图内 V_{sh} 和 R_{s} 的投点,拟合了 Y1 和 Y2 两条充填物性质识别分界线,形成了一套识别洞穴充填物性质的标准^[26](表 2)。王晓畅优选 9 个识别缝洞体类型敏感的测井响应交会图版,结合决策树方法,实现逐级识别洞穴充填物类型^[27]。此外,Zhang^[21]使用 $GR-R_{\text{s}}$ 或 $\Delta R-V_{\text{sh}}$ 交会图识别机械充填、未充填或低填充部位,得到了较好的应用效果。

另一方面,成像测井手段也普遍运用在洞穴充填物识别工作中。在电成像测井图上,未充填的洞穴,

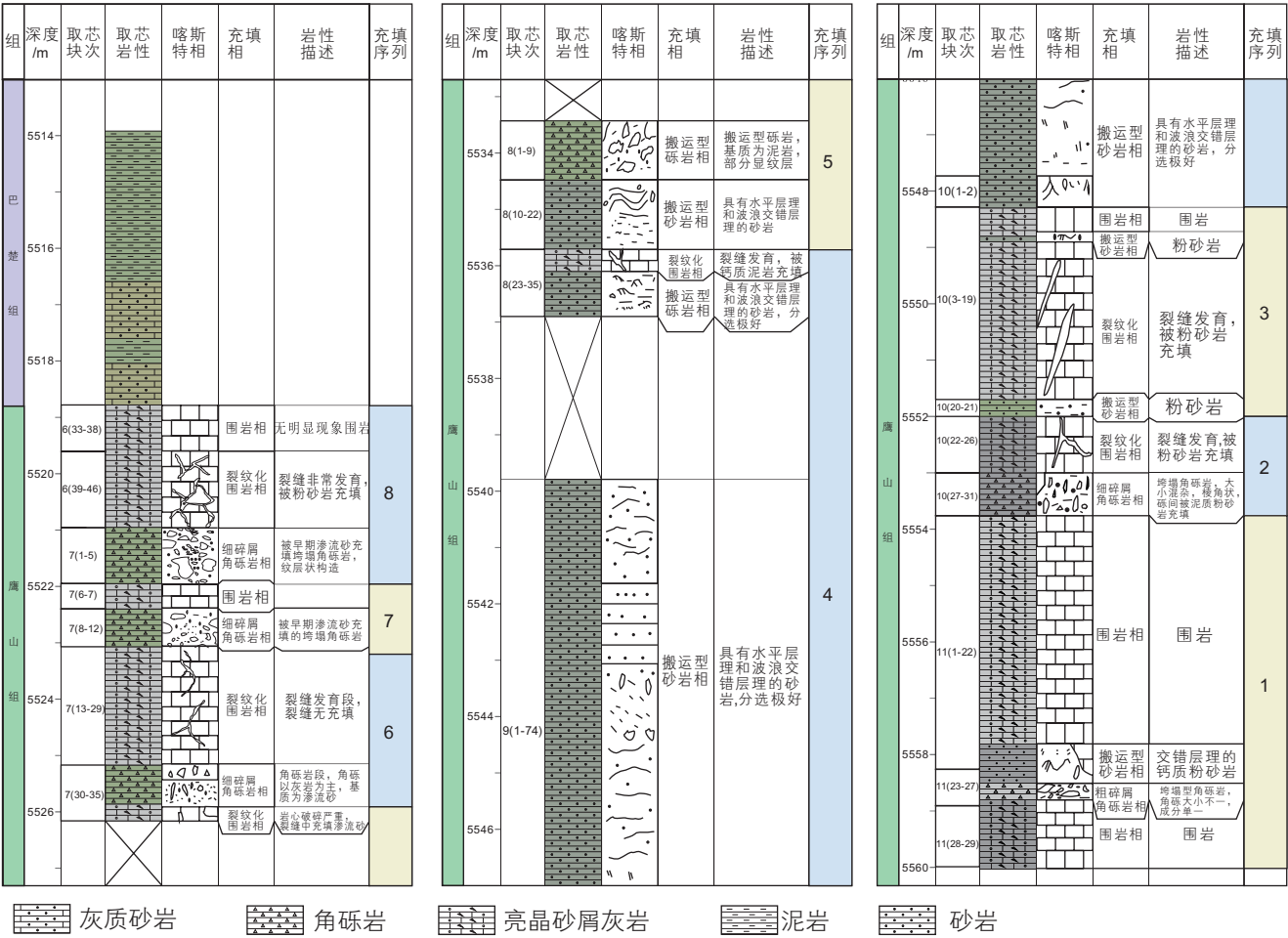


图 3 塔河油田 T615 井奥陶系洞穴充填序列 (据文献 [40] 修编)

Fig. 3 Cave filling sequence of the Ordovician in the T615 well, Tahe Oilfield (revised from reference[40])

表 2 塔河油田洞穴充填物性质识别标准^[26]

Table 2 Identification criteria for the properties of cave filling materials in Tahe Oilfield^[26]

充填类型	划分区间	特征值赋值
未充填段	$R_{\text{s}} < 50\ \Omega\cdot\text{m}$, $V_{\text{sh}} < Y_1$	0
机械充填物	$R_{\text{s}} < 100\ \Omega\cdot\text{m}$, $Y_1 < V_{\text{sh}} < Y_2$	1
垮塌角砾岩	① $R_{\text{s}} < 600\ \Omega\cdot\text{m}$ $V_{\text{sh}} > Y_2$ ② $400\ \Omega\cdot\text{m} < R_{\text{s}} < 1000\ \Omega\cdot\text{m}$	2
化学沉积物	$\text{DEN} > 2.71\ \text{g/cm}^3$, $R_{\text{s}} > 4000\ \Omega\cdot\text{m}$	3

表 3 古岩溶缝洞改造程度的判识标准

Table 3 Identification criteria for the degree of transformation of palaeokarst caves-fracture

类型	充填程度判识方法	判识基本原理	应用地区	代表作者
测井	测井资料交会图定性	从测井的角度利用自然伽马和密度值交会图法和多变	轮古地区,	赵军等 ^[46]
	判别洞穴充填程度	量综合判别分析法来定性识别洞穴储层的充填程度	塔河地区	
	基于测井资料计算模	利用声波时差异常段、自然伽马相对值大小,建立了	轮古地区,	苏俊磊等 ^[26] ; 王晓畅
	型的洞穴充填程度	洞穴型储层充填程度的定量计算模型	塔河地区	
	洞穴充填程度正演模	针对钻遇洞穴特征,设计不同大小缝洞体和不同充填	于奇西地区,	张瑜等 ^[69] ; 杨晓兰
	拟和敏感性属性提取	程度的地质模型,以波动方程正演模拟为基础,基于	塔河地区	
		属性分析优选敏感属性		等 ^[70] ; 张傲等 ^[59] ;
地震	叠前反演孔隙度和泥	采用叠前弹性反演技术获得弹性参数,采用储层物性	塔河中地区,	周单等 ^[50]
	质含量	反演技术获得充填物含量,结合弹性参数和充填物含		
		量化描述充填程度	于奇地区	
	基于BP神经网络洞	以控制岩溶暗河充填程度的地质控因为输入,以充填	轮古地区	于聪灵等 ^[71]
	穴充填程度判识	程度为输出,建立BP神经网络训练模型		

由于钻井液的侵入,在成像图上大块显示低阻黑色;而对于充填型洞穴,则取决于充填物的类型和特征。洞穴充填物主要有角砾岩、砂岩、泥岩和灰质 4 种类型:角砾岩呈斑状,杂乱堆积;砂、泥岩洞穴一般呈黑色-棕色低阻显示;结晶碳酸盐岩洞穴因电阻率高,图像呈白色。洞穴及其充填物与碳酸盐岩围岩浅棕-亮黄色中高阻电成像测井特征易于区别^[47-48]。

2.3 地震手段

近十年,随着高分辨率地震数据的采集,越来越多的学者通过地震资料进行洞穴充填物识别工作。目前识别方法包括两个方面:一是通过叠前参数反演得到描述储层的孔隙度、泥质、灰质含量等参数,综合预测暗河充填物类型^[49-50]。二是通过分析井曲线与井旁道地震属性的关系,进行单属性、多属性分析,并通过概率神经网络建立井曲线与地震属性的非线性映射关系,然后将该关系应用到相关地震数据体,得到储层岩石物理特征,进而识别充填物类型^[51]。然而,由于地球物理资料保真度和分辨率的限制,到目前为止,仍然没有一种有效地利用地震资料进行洞穴内部充填物预测的手段。

2.4 机器学习手段

长期以来,针对洞穴充填物的识别都是依靠常规测井曲线或成像测井的定性或半定量的识别方法,随着计算机科学的发展,越来越多人工智能、机器学习的方法被引入到洞穴充填物识别的工作中^[52]。从目前人工智能展现出的强大的能力来看,AI技术是新时代缝洞型油藏洞穴内部充填物识别攻坚克难的利器^[53]。

康志宏根据其中单井常规测井响应和洞穴充填相的划分结果,选用 GR 、 R_D 、 R_S 、 K_3 (深浅侧向电阻率倒数差的绝对值)、 AC 、 DEN 和 CNL 共 7 种测井信息作为神经网络的输入学习样本,经学习训练建立了储层划分的神经网络模型^[21]。陈钢花利用BP神经网络对储层缝洞中的泥质、砂质和结晶质 3 种充填物进行识别与预测^[54];谢玮等利用参数优化的最小二乘支持向量机法,划分缝洞充填物为无充填、泥质充填、硅质充填和结晶碳酸盐岩充填 4 种,识别效果好于BP神经网络法^[55];蓝茜茜将集成学习技术应用于碳酸盐储集体划分中将集成学习家族中Boosting算法和Bagging算法有机结合,应用支持向量机、决策树和浅层神经网络作为基分类器,将AdaBoost.M2算法的强分类器预测结果继续作为Bagging算法的基分类器,得到最终的储集体识别结果^[28]。

纵观前人研究,国内外学者利用多种数据资料应用多种技术手段对古岩溶洞穴充填物类型进行定性/半定量识别,尽管测井、岩芯资料直接可靠却有限,地震数据广泛但是由于分辨率低所以识别结果不精确,如何充分融合这些数据,扬长避短,能够精确且广泛地定量识别充填物类型是目前精细化缝洞型油藏表征与描述中亟需解决的问题。

3 古岩溶洞穴充填程度的判识

碳酸盐岩缝洞型油藏洞穴充填程度是评价缝洞型储层是否具有储集空间和有效性的一个重要指标,充填程度高低决定了洞穴产能的大小,因此洞穴充填程度的研究尤为重要^[56]。

在油田企业的实际生产应用过程中,根据其充填程度,将塔河油田奥陶系洞穴分为未充填、部分充填和全充填 3 种程度^[57]。不同学者先后使用数值模拟^[58-60]和物理实验模拟^[61-64]的方法分别研究测井和地震信号与洞穴充填程度的响应关系,为基于测井和地震数据判识洞穴的研究提供了理论依据(表 3)。此外,有少量的学者根据生产数据和油井的 PVT 资料,准确计算了油藏单元动态储量和驱水波及储量,进而计算了洞穴的充填程度^[65]。

3.1 洞穴充填程度定性判别

早期由于资料和计算机水平的限制,绝大多数学者对充填程度进行划分时都采用未充填、半充填和全充填的定性分类方案。具体来说,是基于测井资料交会图定性判别洞穴充填程度,其基本原理为从测井的角度利用自然伽马和密度值交会图,结合钻录井结果和电成像测井分析,利用综合判别分析法来定性识别洞穴储层的充填程度^[47,60,66-68]。这种分类方案较为简单,易于操作,在油田开发的过程中较为广泛地使用。

3.2 洞穴充填程度半定量、定量判别

随着塔河油田开发进入中后期阶段,对缝洞型油藏,特别是洞穴型储层的精细描述越发重要,前期定性判别洞穴充填程度的方法已经不能满足实际生产开发的需求。因此,学者逐步提出了新的判别方法。首先,基于测井资料计算模型的洞穴充填程度定量分析。其基本原理为利用声波时差异常段、斯通利波波形能量衰减程度、自然伽马面积相对值大小,建立洞穴型储层充填程度的定量计算模型。其次,基于正演模拟和敏感性属性提取,即针对已钻遇洞穴特征,设计不同大小的缝洞体和不同充填程度的岩石物理模型,以波动方程正演模拟为基础,基于属性分析优选出对洞穴大小和充填程度敏感的属性判别洞穴程度^[50,59,69-70],这种利用正演模拟的洞穴充填相识别溶洞的充填性得到了业内专家的广泛认可。然而,这种方法并没有摆脱地震分辨率的限制,因此得到的结果正确率仍然不高。此外,还有基于神经网络的洞穴充填程度判识的方法,以控制岩溶暗河充填程度的地质控因为输入,以充填程度为输出,建立 BP 神经网络判别模型^[71]。

从洞穴充填程度识别研究进展来看,传统上利用经验法、交汇图法等具有主观因素的识别方法正在逐渐被兴起的以大数据人工智能为主导的方法取代,判别的标准也逐步从定性转变为数字化、定量化,这一转变同样展示了下一步洞穴充填研究的趋势。

4 古岩溶洞穴充填模式的建立

在缝洞型油气田的开发过程中,精细的古岩溶洞穴的充填模式对于油气勘探开发的指导作用非常显著。在充填模式建立的基础上,可以有效识别和预测主要的油气储集层分布范围,从而指导钻井位置的选择和开发策略的制定,极大地提高了资源的开发效率和经济效益。

在塔河油田多年的研究过程中,众多学者专家构建了不同的古岩溶洞穴充填模式。其一是按照不同的岩溶分带类型,分别构建岩溶分带内部的充填模式,如王聿铭在统计了塔河主体区大量不同岩溶分带洞穴中的充填物类型后,认为表层岩溶带具有河流沉积的特点,多砂泥充填以及部分垮塌充填;渗流岩溶带内部充填物以垮塌角砾堆积物及碳酸钙等化学胶结物为主;径流岩溶带内部充填物以细粒黏土和粉砂充填物为主^[72],并以此为基础构建不同的充填、垮塌模式。其二是引入缝洞系统的概念,对统一的水动力条件形成的缝洞体进行充填物物源的分析,并以此构建充填模式。这种分类方案将不同岩溶分带视为一个整体不可分割,同一个充填模式应该包含不同的岩溶分带类型,如曹建文构建了外源型地下河充填模式、内源型充填模式、上下结构充填模式、圈层结构充填模式、嵌入式混合充填模式等 5 种典型碳酸盐岩缝洞系统充填模式^[73],这种充填模式的构建更加符合碳酸盐岩缝洞型油藏的开发思路,体现了系统论的思想。其三,一些学者依据相似性理论,以塔河奥陶系储层为背景,利用融蜡成腔方法制作未充填、砂泥充填和水充填 3 类球型溶洞,揭示不同充填类型溶洞的垮塌机制,构建了相应的充填模式^[74-75]。这种充填模式的构建在一定程度上正演了洞穴内部充填的过程,但由于塔河油田储集体的实际尺度与物理实验模拟的尺度差距过大,并且洞穴型储层不仅经历了裸露期的大气淡水改造作用,还经历了埋藏期的改造作用,这种叠加的复杂改造作用很难利用物理模型手段进行模拟,因此所构建的充填模式并不能代表真实的充填过程。

洞穴碎屑质沉积物的充填主要由沉积物的输入方式和沉积物在洞道中的水动力条件决定的。不同的输入方式决定了洞穴沉积物的充填,Farrant 和 Smart 以及 Herman 等人的研究表明,地下洞穴系统在碎屑质沉积物的输入方式上存在断头河外源型输入、落水洞堵塞性注入、土壤通过岩石缝隙及竖井(或直立的排水沟管)的向下冲刷、河流基面回泛以及围岩不溶残留

等多种方式(图 4),因而有限堆积的区域包括:①紧邻沉积物输入点的近地表洞道,尤其是低坡降河流型洞道或狭窄的入口洞道;②巨砾垮塌阻塞或其他限制型如落水洞垮塌的后地;③在具稳定潜水面的下弯潜流管道内或洞道的洪泛段;④在遭受河流回泛的活动和残留洞道;⑤在遭受来自竖井流和裂缝流充填的残余洞道。同时指出,具共生作用的洞段容易发生厚的沉积堆积^[76-77]。图 4 中 A~D 代表不同类型的地表水与地下水的交换类型以及地表沉积物进入地下的方式。这种通过研究洞道形态来恢复洞穴中沉积部位的水动力学特征,进而明确不同类型的洞穴充填物,是一种新的构建洞穴发育模式的思路。

基于此,蔡忠贤团队在研究轮古地区古岩溶暗河型储层充填模式的过程中,依据暗河级别、洞穴充填

与洞道样式的关系进行展开,特别是对于暗河洞道类型以及洞穴样式的具体内容——建立模式,将暗河洞道所处于的不同地貌单元进行分析。对于不同的地貌单元来说,其水动力条件差异较大,导致岩溶作用强度以及充填程度也有不同。这种充填模式的构建方法,充分考虑了水文地貌控制下水动力的影响因素,又结合了洞穴内部的充填物类型及序列,有效地构建了岩溶洞穴充填模式^[78](表 4)。

5 存在的科学问题及展望

作为塔河油田最主要的储集空间类型,自上个世纪 80 年代以来,古岩溶洞穴型储层一直是该地区科研工作者的研究热点,也逐步形成了碳酸盐岩缝洞型油

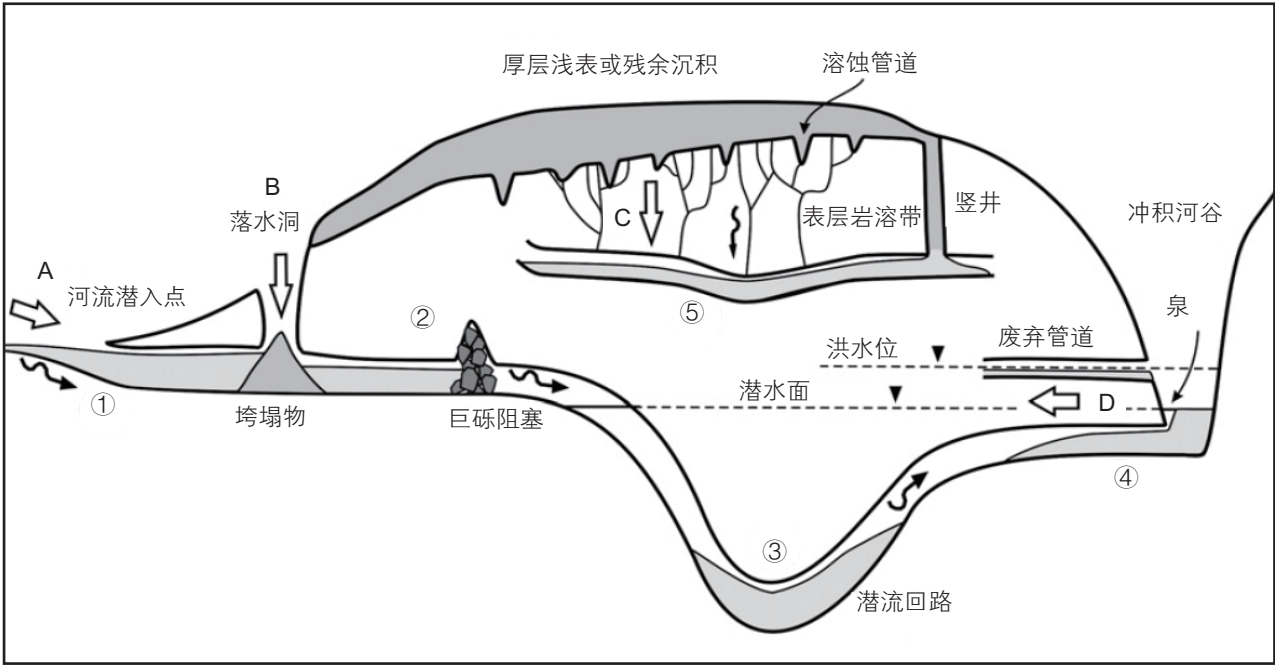


图 4 不同洞道样式与充填类型关系模式图(据文献[76]修编)(其中 A~D 为沉积物的进入点,①~⑤为泥沙淤积的首选区域)
Fig. 4 Pattern diagram of the relationship between different karst conduits styles and filling types (Revised from reference[76])
(A~D are the sediment entry points, and ①~⑤ are the preferred areas of sediment accumulation)

表 4 塔河地区古岩溶充填模式对比表
Table 4 Comparison of paleokarst filling modes in Tahe Area

划分方案	划分方案内涵	代表作者
表层岩溶带充填模式、渗流带充填模式、径流带充填模式	按照不同的岩溶分带类型划分	王聿铭 ^[72]
外源型地下河充填模式、内源型充填模式、上下结构充填模式、圈层结构充填模式、嵌入式混合充填模式等	按照缝洞系统概念	曹建文等 ^[73]
未充填垮塌模式、砂泥充填垮塌模式、水充填垮塌模式	按照相似性理论构建物理模型	吕心瑞等 ^[74]
峰丛区顺河潜流型水平潜流洞道充填模式、干谷区伏流型水平潜流洞道充填模式、峡谷区顺河潜流型水平潜流洞道充填模式	按照地貌单元和暗河发育部位的 区别	蔡忠贤等 ^[78]

藏古岩溶洞穴型储层独特的研究方案。围绕古岩溶暗河结构精细解剖这一研究目标,表征和描述古岩溶洞穴几何结构、量化预测洞穴内部充填物类型和充填程度是揭示古岩溶洞穴充填地质规律、明确古岩溶洞穴有效储集空间分布范围的前提,这对于寻找高含水期结构性剩余油和缝洞型油藏挖潜以及井位部署具有重要的意义(图 5)。

然而,从现有的国内外研究进展分析,还存在以下不足:

1) 钻井所揭示的古岩溶洞穴充填物类型的划分依据主要遵循的是岩石物理组分的差异,并没有体现充填物形成的动力学机制。学术界对于洞穴充填物类型的划分主要考虑搬运型、垮塌型和化学沉淀型 3 大类,但这种划分方案并没有深入揭示这些充填物是在何种水动力条件之下形成的,尤其是对于洞穴内部的碎屑质充填来说,采用表 1 的划分有助于理解洞穴的形成与演化过程以及洞穴所处于的古岩溶水文地质条件。在多年的开发实践过程中,古洞穴充填相的划分一直没有被统一。一方面由于缝洞型油藏的特殊性,其洞穴内部充填物的取芯资料相对较少,连续取芯的洞穴充填井更是罕见;另一方面,成像测井资料由于其分辨率的限制,仅能勉强定性识别充填物质的边界,因此现代地表种类繁多的洞穴充填相划分方案无法很好地应用于古岩溶洞穴的研究。

2) 针对洞穴充填物的识别精度有待提升。常规测井资料是识别洞穴充填物最直接且有效的方法,被现场的专家学者广泛使用。但目前的方法主要通过建立常规测井数据交汇图版来对充填类型进行定性识别,导致不同类型充填物重叠交汇无法进行有效区分,一

方面是仅使用常规测井曲线进行交汇图版的绘制,没有充分利用多测井信息来进行定量判识;另一方面,目前广泛使用的划分方案是将充填物划分为搬运型、垮塌型、化学沉积型等。根据这种划分方案,在测井交汇图中势必会有重叠区从而无法完全识别,这是因为从搬运型和垮塌型充填相的岩石物理组构的角度来看,两者均为砂泥质和碳酸盐岩的混合物,虽然其成因类型上差异巨大,但在测井响应特征上却极为相似。因此,应该从岩石物理组分的测井响应差异性的角度出发进行区分。同时,古岩溶暗河作为一种特殊的洞穴,其发育过程和充填改造更为复杂,由于其处于地下水流场中,水循环过程及其复杂,导致其内部充填物呈现出多期次多类型的特征。针对这种连续的地下古岩溶管道,地震资料的使用及其重要,但又严重受限于其分辨率,基于地震数据体的暗河充填类型的识别研究仍在攻关,目前研究进展依旧薄弱。

3) 充填程度的识别与预测是油田企业在生产勘探开发过程中面临的最核心且最关键的问题,其准确度直接影响了井位的部署和产量的预测。目前学术界主要是通过岩芯观察和测井解释的角度来表征古岩溶暗河的充填程度,且绝大部分为定性识别,将充填程度简单划分为未充填、部分充填和全充填,这种划分方案在油田企业获得了极为广泛的应用。但是在岩芯和测井资料的使用上,只能做到对已钻井充填情况的分析,无法做到在钻井之前准确预测。针对这种困境,地震资料的使用对充填程度的判别与预测起到了关键的作用。对地震资料的使用经过多年的攻关,取得了一定的进展,但是,现有的预测技术效率、准确度低,且泛化能力差。目前利用地震反演技术得到的洞穴充

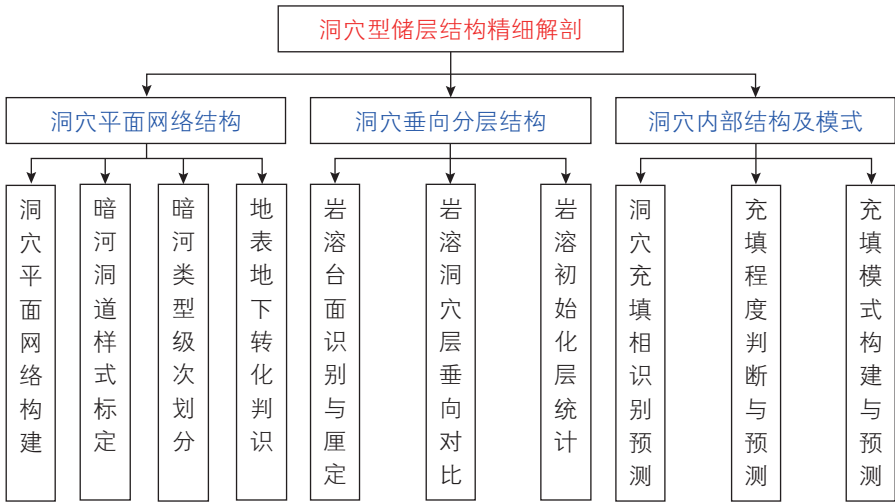


图 5 碳酸盐岩缝洞型油藏洞穴型储层结构精细解剖方案

Fig. 5 Detailed anatomy scheme of cave type reservoir structure in carbonate fractured vuggy reservoirs

填预测的结果只能对泥质含量进行预测,无法对所有充填物充填程度进行准确评价,对古岩溶暗河网络充填程度空间差异分布的认识尚未取得实质性突破。

目前,机器学习、人工智能与各学科融合产生了各种新的技术,塔里木盆地塔河地区碳酸盐岩由于经历了多期构造运动、多期岩溶叠加改造、多期成藏等过程,具有储集空间类型多样、缝洞尺度差异大和储集体形态极不规则、分布离散随机等特征,为人工智能技术的开展提供了大量的多样化学习样本,利用人工智能技术进行洞穴充填物类型和充填程度的判断已经是大势所趋,如何提高样本集的代表性、提高网络的准确性和泛化度是下一步需要努力的方向。

另一方面,在地震分辨率尚未取得显著性提升、人工智能算法尚未取得突破性进展的现状下,也需要寻找洞穴充填预测研究新思路。从地质的角度出发,参考现代地表洞穴充填地质规律,明确洞穴充填的主控因素。进而,结合井下地球物理与实钻资料,分析古岩溶洞穴发育的水文地貌条件和水动力场特征,从岩溶水循环的视角出发,构建不同类型与不同结构岩溶洞穴的形成与演化模式,揭示控制洞穴改造作用与改造程度的关键因素,进行基于地质控因的充填概率预测也不失为一种可行的方法。

6 结论

1)古岩溶洞穴充填作用研究是碳酸盐岩缝洞型油

藏洞穴型储层结构精细解剖的重要组成部分。该方向的研究主要集中在古岩溶洞穴内部充填相的划分与识别、洞穴充填物和洞穴充填程度的判断与预测以及洞穴充填地质模式的构建3个方面。

2)洞穴充填相的地质认识以两个维度的成因分类方案的提出作为重要标志:现代地表洞穴碎屑质充填相成因类型和古岩溶洞穴充填的划分。围绕岩溶洞穴碎屑充填相的划分,主张根据来源于洞内还是洞外将碎屑质沉积分成两大类,并综合考虑沉积搬运机理的差异,为洞穴内部堆积物的来源与成因模式研究提供了重要的理论依据;古岩溶洞穴充填相可划分为重力崩塌堆积、流水机械沉积和化学沉积(淀)3大类。

3)洞穴充填物的识别与预测、洞穴充填程度的判别是古岩溶洞穴充填研究领域技术层面的集中攻关方向。早期采用的普遍方法均为利用测井和地震资料的定性、半量化方法。随着人工智能技术的兴起,利用机器学习的强大的泛化能力进行充填物、充填程度的识别与预测成为该领域的前沿技术研发方向。

4)古岩溶洞穴充填模式的划分方案众多,体现了对洞穴充填地质过程及地质应力形成机制的差异性认识。从实际应用价值的角度来看,本文更倾向于在缝洞系统的框架内,利用水文地貌与洞穴发育部位的耦合关系,并结合实钻井揭示(或是采用预测手段)的洞穴内部充填物类型进行充填模式的构建,才具有理论和实际应用价值。

参考文献

- [1] 毛治国,崔景伟,綦宗金,等.风化壳储层分类、特征及油气勘探方向[J].岩性油气藏,2018,30(2):12-22.[MAO Z G, CUI J W, QI Z J, et al. Classification, characteristics, and oil and gas exploration direction of weathered crust reservoirs[J]. Lithological Oil and Gas Reservoirs, 2018, 30(2): 12-22.]
- [2] TONG K J, HE J, DONG S Q, et al. Fracture characterization of Asmari Formation carbonate reservoirs in G Oilfield, Zagros Basin, Middle East[J].Energy Geoscience,2023,4(3): 100178.
- [3] YANG D B, MA H L, REN W B, et al. Fracture identification and characterization of Ordovician carbonate rock reservoir in block B of the Tahe Oilfield[J].Carbonates and Evaporites,2024, 39(2): 1-14.
- [4] 潘建国,卫平生,蔡忠贤,等.塔中地区中一下奥陶统碳酸盐岩孔洞—裂缝储集系统划分及其特征[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(4):751-762.[PAN J G, WEI P S, CAI Z X, et al. Classification and characteristics of pore fracture reservoir systems in Middle-Lower Ordovician carbonate rocks in the Tazhong Area[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(4): 751-762.]
- [5] 康玉柱.塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望[J].中国地质,2003,32(3):315-319.[KANG Y Z. Geological conditions and prospects for the formation of Tahe Oilfield in Tarim Basin[J]. Chinese Geology, 2003, 32(3): 315-319.]
- [6] 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. Development Theory and Methods of Carbonate Fractured and Caved Reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Journal of Petroleum, 2013, 34(1): 115-121.]
- [7] ZHANG W B, ZHANG W B, HE Z L, et al. Hierarchical modeling of carbonate fault-controlled paleokarst systems: A case study of the Ordovician reservoir in the Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10: 840661.

- [8] 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. Research on multi class and multi scale modeling methods for fractured and caved carbonate reservoirs: A case study of Ordovician oil reservoirs in area 4 of Tahe Oilfield[J]. Geological Frontiers, 2012, 19(2): 59–66.]
- [9] 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 W G. Paleokarst fracture cave types and their transformation in the buried hill area of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2022, 43(1): 43–53.]
- [10] 康玉柱. 中国海相油气田勘探实例之四——塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005(4): 31–38. [KANG Y Z. Discovery and exploration of Tahe Oilfield in Tarim Basin[J]. Marine Oil and Gas Geology, 2005(4): 31–38.]
- [11] LU X B, WANG Y, YANG D B, et al. Characterization of paleokarst reservoir and faulted karst reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin, China[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2020, 4(3): 339–348.
- [12] ZHU D L, GUO R, LI X W, et al. Paleokarst caves recognition from seismic response simulation to convolutional neural network detection[J]. Geophysics, 2024, 89(1): 265–277.
- [13] 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 Y, LU X B, CAI Z X, et al. Characteristics of Early Hercynian paleogeomorphology in Tahe Oilfield and its control over cave development[J]. Journal of Petroleum, 2016, 37(8): 1011–1020.]
- [14] LI J Q, KANG Z H, KANG Z J, et al. Hydrothermal fluid alteration of the Ordovician epigenetic karstification reservoir in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Science of The Total Environment, 2024, 912(5): 169363.
- [15] 金强, 张三, 孙建芳, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶相形成和演化[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 513–525. [JIN Q, ZHANG S, SUN J F, et al. Formation and evolution of karst facies in Ordovician carbonate rocks in Tahe Oilfield[J]. Journal of Petroleum, 2020, 41(5): 513–525.]
- [16] 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 S, JIN Q, HU M Y, et al. Differences in structural combinations and oil and gas enrichment of karst zones in different landforms of the Ordovician in the Tahe Area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 962–973.]
- [17] 张三, 金强, 田雯, 等. 塔河地区海西早期岩溶斜坡上分水岭的组成及其缝洞结构[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 12–22. [ZHANG S, JIN Q, TIAN W, et al. Composition and fracture structure of watershed on karst slopes in the early Hercynian period of the Tahe Area[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2021, 45(3): 12–22.]
- [18] 徐微, 蔡忠贤, 贾振远, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞充填物特征[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 287–293. [XU W, CAI Z X, JIA Z Y, et al. Characteristics of karst cave filling materials in Ordovician carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Modern Geology, 2010, 24(2): 287–293.]
- [19] 郭春涛, 史江涛, 刘亮, 等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统沉积特征及其演化模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 68–82. [GUO C T, SHI J T, LIU L, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of the Middle and Lower Ordovician in the Tahe Area of the Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 68–82.]
- [20] 刘存革, 徐明军, 云露, 等. 塔里木盆地阿克库勒凸起奥陶系海西晚期古岩溶特征[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 280–285. [LIU C G, XU M J, YUN L, et al. Ordovician late Hercynian paleokarst characteristics of Akekule uplift in the Tarim Basin[J]. Petroleum Experimental Geology, 2015, 37(3): 280–285.]
- [21] ZHANG C H, GAO Z Q, FAN T L, et al. Analysis of spatial structure and filling mechanism of a paleokarst channel against a background of denudation: A case study in the Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 158: 106534.
- [22] DING Y Z, ZHANG Q Y, XIANG W, et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters of collapse roof of carbonate rock deep buried oilfield[J]. Energies, 2023, 16(10): 4141.
- [23] 陈石, 梁鑫鑫, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田古生界走滑断裂发育特征及控圈模式[J]. 石油科学通报, 2025, 10(01): 1–15. [CHEN Shi, LIANG Xinxin, ZHANG Yintao, et al. Development characteristics of Paleozoic strike-slip fault and its control on traps in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 1–15.]
- [24] 陈轩, 刘王涵, 鲍典, 等. 塔河油田奥陶系古岩溶洞穴充填物时代鉴别特征及其储集意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 65–75. [CHEN X, LIU W H, BAO D, et al. Identification characteristics and reservoir significance of filling materials in Ordovician ancient karst caves in Tahe Oilfield[J]. Geoscience Frontiers, 2023, 30(4): 65–75.]
- [25] 马庆佑, 曹自成, 蒋华山, 等. 塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性及其与油气富集的关系[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 327–334. [MA Q Y, CAO Z C, JIANG H S, et al. Connectivity of strike-slip fault zones and their relationship with Hydrocarbon accumulation in the Tahe-Shunbei Area[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(4): 327–334.]
- [26] 苏俊磊, 张松阳, 王晓畅, 等. 塔河油田碳酸盐岩洞穴型储层充填特性常规测井表征[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1264–1269. [SU J L, ZHANG S Y, WANG X C, et al. Conventional logging characterization of filling properties of carbonate cave type reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1264–1269.]

- [27] 王晓畅, 张军, 李军, 等. 基于交图决策树的缝洞体类型常规测井识别方法——以塔河油田奥陶系为例[J]. 石油天然气地质, 2017, 38(4): 805–812. [WANG X C, ZHANG J, LI J, et al. A conventional logging identification method for fracture and cave body types based on intersection diagram decision tree: Taking the Ordovician in Tahe Oilfield as an example[J]. Geology of Oil and Gas, 2017, 38(4): 805–812.]
- [28] 蓝茜茜, 张逸伦, 康志宏, 等. 基于集成学习的碳酸盐岩储集体类型划分——以塔河油田T615井组为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7231–7238. [LAN X X, ZHANG Y L, KANG Z H, et al. Classification of carbonate reservoirs based on ensemble learning: A case study of well group T615 in Tahe Oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 20(18): 7231–7238.]
- [29] 陈华鑫, 康志宏, 康志江. 塔河油田碳酸盐岩油藏古溶洞层状结构及形成机理[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 695–708. [CHEN H X, KANG Z H, KANG Z J. Layered structure and formation mechanism of paleokarst caves in carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Modern Geology, 2022, 36(2): 695–708.]
- [30] ANA E, JOAN J F, LUIS F A, et al. Mineralogical and sedimentological characterization of the clay-rich sediments from Ases Cave (Cova Dets Ases, Mallorca, Spain): Origin and classification[J]. Minerals, 2022, 12(1473): 1473.
- [31] FORD D, WILLIAMS P W. Karst Hydrogeology and Geomorphology[M]. Wiley, 2015.
- [32] GILLIESON D. Cave sedimentation in the new Guinea Highlands[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(5): 533–543.
- [33] SPRINGER G S, KITE J S. River-derived slack water sediments in caves along Cheat River, West Virginia[J]. 1997, 18(2): 91–100.
- [34] BOSCH R F, WHITE W B. Lithofacies and transport of clastic sediments in karst aquifers [M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publisher, 2004.
- [35] WHITE W B. Cave sediments and paleoclimate[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2007, 69(1): 76–93.
- [36] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795–1834.
- [37] 张美良, 林玉石, 冉景丞, 等. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 15–22. [ZHANG M L, LIN Y S, RAN J C, et al. Characteristics of karst caves in Libo, Guizhou[J]. China Karst, 2000, 19(1): 15–22.]
- [38] 肖玉茹, 王敦则, 沈杉平. 新疆塔里木盆地塔河油田奥陶系古洞穴碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 92–98. [XIAO Y R, WANG D Z, SHEN S P. Characteristics and controlled factors of Ordovician paleocave carbonate reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin, Xinjiang[J]. Modern Geology, 2003, 17(1): 92–98.]
- [39] KERANS C. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger group carbonates of West Texas[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(10): 1160–1183.
- [40] 张恒. 塔里木盆地中下奥陶统岩溶储层形成机制及其与二叠纪盆地同类储层的对比[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016. [ZHANG H. Formation mechanism of karst reservoirs in the Middle and Lower Ordovician of the Tarim Basin and its comparison with similar reservoirs in the Permian basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2016.]
- [41] ZHU Z J, KANG Z H, CHEN H X, et al. Analysis of the filling patterns and reservoir development models of the Ordovician paleokarst reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 161: 106690.
- [42] 刘晶晶, 毛翠, 魏合华, 等. 塔河油田奥陶系缝洞充填序列及测井响应[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 46–52. [LIU J J, MAO C, WEI H H, et al. The filling sequence and logging response of Ordovician fractures and caves in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 46–52.]
- [43] 徐嘉宏, 康志宏, 蓝茜茜. 塔河奥陶系油藏岩溶储层类型、洞穴结构和发育模式: 以塔河油田7区T615缝洞单元为例[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1181–1192. [XU J H, KANG Z H, LAN Q Q. Karst reservoir types, cave structures, and development patterns in the Ordovician of Tahe Oilfield: A case study of the T615 fracture-cave unit in area 7 of Tahe Oilfield[J]. Geoscience, 2020, 34(6): 1181–1192.]
- [44] 陈轩, 刘王涵, 鲍典, 等. 塔河油田奥陶系古岩溶洞穴充填物时代鉴别特征及其储集意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 65–75. [CHEN X, LIU W H, BAO D, et al. Layered structure and formation mechanism of paleokarst caves in carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Geological Frontiers, 2023, 30(4): 65–75.]
- [45] 陈利新, 王胜雷, 姜振学, 等. 哈拉哈塘油田塔河北区块奥陶系断裂发育特征及断控区储层类型与分布预测[J]. 石油科学通报, 2024, 9(3): 408–421. [CHEN L X, WANG S L, JIANG Z X, et al. Fault characteristics, reservoir types and distribution prediction in a fault-controlled area in the Ordovician strata of the Tahebei Block, Halahatang Oilfield[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(3): 408–421.]
- [46] 赵军, 李宗杰, 余兵, 等. 碳酸盐岩洞穴充填物及充填程度测井判别方法[J]. 中国喀斯特, 2013, 32(2): 225–230+237. [ZHAO J, LI Z J, YU B, et al. A logging discrimination method for carbonate cave filling materials and their degree of filling[J]. Karst China, 2013, 32(2): 225–230+237.]
- [47] ZHANG S, JIN Q, HU M Y, 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): 1113–1125.
- [48] 张卫峰, 张晓明, 王晓畅, 等. 顺北地区断控缝洞体测井响应特征和类型识别方法[J]. 石油物探, 2024, 63(1): 254–264. [ZHANG

- W F, ZHANG X M, WANG X C et al. Logging response characteristics and type identification methods of fault-controlled fracture-cave bodies in the Shunbei Area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2024, 63(1): 254–264.]
- [49] 胡华锋, 鲍典, 马灵伟, 等. 基于高频衰减梯度的碳酸盐岩洞穴储层规模识别方法——以塔河油田岩溶古河道洞穴储层为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 57(6): 892–901. [HU H F, BAO D, MA L W, et al. A method for identifying the scale of carbonate cave reservoirs based on high frequency attenuation gradient: A case study of karst ancient river cave reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2018, 57(6): 892–901.]
- [50] 周单, 吕慧, 王震. 基于叠前反演的岩溶古河道充填特征描述方法[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(1): 348–356. [ZHOU D, LV H, WANG Z. A method for describing the filling characteristics of karst ancient river channels based on pre-stack inversion[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(1): 348–356.]
- [51] 张慧涛, 王金柱, 杨敏, 等. 塔河奥陶系岩溶古地下河充填特征研究[J]. *新疆石油天然气*, 2020, 16(1): 4–10+1. [ZHANG H T, WANG J Z, YANG M, et al. A study on the filling characteristics of karst ancient underground rivers in the Ordovician system of the Tahe paleokarst conduits[J]. *Xinjiang Petroleum and Natural Gas*, 2020, 16(1): 4–10+1.]
- [52] 刘俊东, 蒲秀刚, 常静春, 等. 闭塞湖盆页岩油储层测井岩性综合评价技术[J]. *石油科学通报*, 2021, 6(1): 58–66. [LIU J D, PU X G, CHANG J C, et al. Logging of a shale oil reservoir in a closed lake basin: A comprehensive lithology evaluation technique[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(1): 58–66.]
- [53] 董少群, 曾联波, 车小花, 等. 人工智能在致密储层裂缝测井识别中的应用[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2443–2461. [DONG S Q, ZENG L B, CHE X H, et al. Application of artificial intelligence in logging identification of fractures in tight reservoirs[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2443–2461.]
- [54] 陈刚华, 胡聪, 曾亚丽, 等. 基于 BP 神经网络的碳酸盐岩储层充填物测井识别方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 54(1): 99–104. [CHEN G H, HU C, ZENG Y L, et al. A logging identification method for filling materials in carbonate reservoirs based on BP neural network[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2015, 54(1): 99–104.]
- [55] 谢玮. 基于机器学习的缝洞识别及多波联合反演方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [XIE W. Research on fracture-cave identification and multi-wave joint inversion method based on machine learning [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.]
- [56] 刘群, 王世星, 顾汉明, 等. 碳酸盐岩缝洞体体积定量计算及影响因素分析——以塔河油田主区为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 52(2): 217–222. [LIU Q, WANG S X, GU H M, et al. Quantitative calculation of carbonate fractures and caves volume and analysis of influencing factors: Taking the main area of Tahe Oilfield as an example[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2013, 52(2): 217–222.]
- [57] ZHANG W B, DUAN T Z, LI M, et al. Architecture characterization of Ordovician fault-controlled paleokarst carbonate reservoirs in Tuoputai, Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 367–380.
- [58] YIN W, WANG J Q, BAI X M, et al. Strata behavior and control strategy of backfilling collaborate with caving fully-mechanized mining[J]. *Open Geosciences*, 2020, 12(1): 703–717.
- [59] 张傲, 李宗杰, 刘军, 等. 基于 Yolox 算法的碳酸盐岩储层溶洞“串珠状”异常反射智能检测[J]. *石油地球物理勘探*, 2023, 58(3): 540–549. [ZHANG A, LI Z J, LIU J ET al. Intelligent detection of "beaded" anomalous reflections in carbonate reservoir cavities based on yolox algorithm[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2023, 58(3): 540–549.]
- [60] 王晓畅, 胡松, 孔强夫. 利用双侧向测井响应计算洞穴充填物电阻率方法[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(3): 1155–1160 [WANG X C, HU S, KONG Q F. A method for calculating the resistivity of cave filling materials using dual lateral logging response[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(3): 1155–1160.]
- [61] 刘聪伟, 李飞, 贺春艳, 等. 基于正演模拟的 VSP 溶洞绕射波特征识别[C]. 2023 油气田勘探与开发国际会议, 武汉, 2023. [LIU C W, LI F, HE C Y, et al. Identification of diffraction wave characteristics of VSP cavities based on forward modeling[C]. 2023 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development, Wuhan, 2023.]
- [62] 李剑峰, 赵群, 郝守玲, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层缝洞系统物理模拟研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 44(5): 428–432. [LI J F, ZHAO Q, HAO S L, et al. A physical simulation study on the fracture cavity system of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2005, 44(5): 428–432.]
- [63] 郑振铎. 洞穴型储层多分量感应测井响应模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020. [ZHENG Z D. Simulation study on the response of multi-component induction logging in cave-type reservoirs[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.]
- [64] 刘玺. 裂缝性地层双侧向测井物理模拟实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014. [LIU X. Experimental study on physical simulation of dual lateral logging in fractured formations[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.]
- [65] 赵宽志, 张丽娟, 郑多明, 等. 塔里木盆地缝洞型碳酸盐岩油气藏储量计算方法[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(2): 251–256. [ZHAO K Z, ZHANG L J, ZHENG D M, et al. Reserve calculation methods for fracture-cave carbonate reservoirs in the Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 251–256.]
- [66] 耿甜, 吕艳萍, 巫波, 等. 缝洞型油藏储量评价方法及开发对策[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(6): 129–136. [GENG T, LYU Y P, WU B,

- et al. Reserve evaluation method and development strategy for fracture-cave reservoirs[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2021, 28(6): 129–136.]
- [67] 李英菊. 塔河油田奥陶系古岩溶洞穴充填特征及其油气响应[D]. 武汉: 长江大学, 2020. [LI Y J. Characteristics of paleokarst cave fillings and their hydrocarbon responses in the Ordovician of Tahe Oilfield[D]. Wuhan: Yangtze University, 2020.]
- [68] ZHANG S, JIN Q, HU M Y, 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): 1113–1125.
- [69] 张瑜, 彭守涛, 汲生珍. 塔河油田七西地区奥陶系洞穴充填程度预测及应用[J]. *新疆地质*, 2017, 35(1): 89–93. [ZHANG Y, PENG ST, JI SZ. Prediction and application of filling degree of Ordovician caves in the Qixi Area of Tahe Oilfield[J]. *Xinjiang Geology*, 2017, 35(1): 89–93.]
- [70] 杨晓兰. 基于正演模型的地震相识别溶洞充填技术——以塔河油田 12 区东奥陶系储层为例[J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(2): 17–21. [YANG X L. Cave-filling technology based on seismic facies identification using forward modeling: A case study of the eastern Ordovician reservoirs in area 12 of Tahe Oilfield[J]. *Complex Reservoirs*, 2019, 12(2): 17–21.]
- [71] 于聪灵, 蔡忠贤, 杨海军, 等. 基于 BP 神经网络的轮古油田奥陶系碳酸盐岩储层洞穴充填程度预测[J]. *新疆石油地质*, 2018, 39(5): 614–621. [YU C L, CAI Z X, YANG H J, et al. Prediction of cave filling degree in Ordovician carbonate reservoirs in Lungu Oilfield based on BP neural network[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(5): 614–621.]
- [72] 王聿铭. 塔河油田主体区奥陶系大型溶洞充填结构特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020. [WANG Y M. Study on the structural characteristics of fillings in large karst caves of the Ordovician in the main area of Tahe Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.]
- [73] 曹建文, 夏日元, 张庆玉, 等. 潮湿环境下典型碳酸盐岩缝洞系统充填模式探讨[J]. *中国喀斯特*, 2015, 34(2): 115–125. [CAO J W, XIA R Y, ZHANG Q Y, et al. Discussion on filling modes of typical carbonate rock fracture systems under humid and hot climate conditions[J]. *Chinese Karst*, 2015, 34(2): 115–125.]
- [74] 吕心瑞, 孙建芳, 孙建芳, 等. 深层碳酸盐岩储层溶洞垮塌物理模拟及分布预测[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1505–1514. [LYU X R, WU X W, SUN J F, et al. Physical simulation and distribution prediction of cave collapse in deep carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1505–1514.]
- [75] 吕心瑞, 孙建芳, 孙建芳, 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. Reservoir structure characterization method for fracture-cave carbonate reservoirs: A case study of the Ordovician reservoir in the S67 unit of Tahe Oilfield in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 728–737.]
- [76] FARRANT A R, SMART P L. Role of sediment in speleogenesis, sedimentation and paragenesis[J]. *Geomorphology*, 2011, 134(1): 79–93.
- [77] ELLEN K, HERMAN J. Clastic sediment transport and storage in fluvio-karst aquifers: An essential component of karst hydrogeology[J]. *Carbonates and Evaporates*, 2012, 27(3): 211–241.
- [78] 蔡忠贤. 轮古潜山暗河发育规律与洞穴充填特征研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017. [CAI Z X. Study on the development law of underground rivers and the characteristics of cave fillings in Lungu buried hill[R]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2017.]

(编辑 付娟娟)

第一作者: 高济元 (1996 年—), 博士研究生, 主要从事碳酸盐岩缝洞型油藏描述和岩溶地质研究, jygao@cug.edu.cn。

通信作者: 张恒 (1988 年—), 博士, 副教授, 研究生导师, 研究方向为岩溶地质学、碳酸盐岩储层地质学和油藏描述研究, hzhang1219@cug.edu.cn。