

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.
DOI: 10.11932/karst202204y10

古岩溶油气储层研究进展

张宇¹, 赵伦¹, 李长海², 张祥忠¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:古岩溶对可溶性岩石的改造作用表现为形成溶蚀孔洞等储集空间, 特别是对于碳酸盐岩地层, 古岩溶发育会极大地改善了地层的储集性能, 形成具有良好孔渗性的岩溶储层。作为碳酸盐岩地层中重要储层类型之一, 岩溶储层的发育与分布对于碳酸盐岩油气藏的形成具有重要意义。文章系统地总结了前人在不同类型岩溶储层以及断溶体等方面的研究成果, 并对古岩溶油气储层研究的最新进展进行了梳理归纳, 这对于认识我国含油气盆地中岩溶储层的发育与分布具有重要参考价值。总结认为古岩溶油气储层研究主要存在以下问题: (1) 早成岩岩溶储层研究实例较少, 且利用测井、地震资料对该类型储层的分布进行预测缺少相应实践; (2) 表生岩溶储层的研究主要集中于古地貌恢复以及垂向分带方面。但目前的古地貌恢复方法, 均具有一定的局限性, 无法对古地貌实现定量恢复。垂向分带的方案众多, 尚未形成一个统一的分类方案, 且在垂向上带与带之间的界线不明确, 无法进行准确地划分; (3) 埋藏岩溶储层的研究主要集中在硫酸盐热还原作用以及热液溶蚀方面, 对于受有机酸影响的埋藏岩溶储层缺少相应的研究; (4) 断溶体的识别、刻画与预测主要依赖于地震资料, 受地震资料分辨率影响显著; (5) 岩溶储层发育的影响因素众多, 仅靠单一地质或者地震资料无法实现对岩溶储层的精准预测。

关键词: 古岩溶; 岩溶储层; 断溶体; 储层预测

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)05-0808-17 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

古岩溶是水对可溶性岩石的一种改造作用, 在碳酸盐岩、盐岩、石膏等可溶性岩石中均有发育, 尤其是在碳酸盐岩地层中发育最为广泛。国内外诸多大型、特大型碳酸盐岩油气田均发育有古岩溶相关的油气储层。在国外, 如俄罗斯尤罗勃钦油田^[1], 美国威尔伯顿油田^[2]、叶茨油田^[3], 伊拉克哈法亚油田, 墨西哥黄金巷油田, 阿联酋法塔赫油田^[4]等(图1)。在国内, 如任丘油田、塔河油田、四川盆地的茅口组和灯影组地层以及鄂尔多斯盆地奥陶系地层等。随

着上述一系列大型、特大型油气田的发现, 古岩溶与油气储层的关系, 尤其是古岩溶与碳酸盐岩油气储层之间的重要关系, 开始获得了国内外石油学家的广泛关注。目前, 前人对于古岩溶油气储层的研究主要集中在表生岩溶储层, 尤其是在古地貌恢复和垂向分带两个方面, 前人进行了大量研究, 提出了多种古地貌恢复方法和划分方案。但对于其他类型的岩溶储层仍缺乏系统性的梳理与总结。本文通过系统总结前人在早成岩岩溶储层、表生岩溶储层、埋藏岩溶储层、“断溶体”、储层发育主控因素以及岩溶储层预测等方面的研究成果, 对古岩溶油气储层

基金项目: 中亚裂缝孔隙型碳酸盐岩油藏稳油控水及提高采收率技术研究(2022DJ3209)

第一作者简介: 张宇(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶储层发育特征研究工作。E-mail: 1760304319@qq.com。

通信作者: 赵伦(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事油气田开发地质研究工作。E-mail: zhaolun@petrochina.com.cn。

收稿日期: 2021-12-10



图 1 全球岩溶储层分布

Fig. 1 Global distribution of karst reservoirs

研究的最新进展进行了梳理归纳,总结了目前古岩溶油气储层研究所存在的问题,明确了下一步古岩溶油气储层研究的重点。

1 古岩溶油气储层类型及研究进展

国外基于成岩作用阶段,将古岩溶划分为早成岩岩溶或同生岩溶、表生岩溶以及深成岩溶^[5]。而国内则将古岩溶划分为(准)同生岩溶、表生岩溶、埋藏岩溶。值得注意的是国外的同生岩溶与国内的同生期岩溶二者并不等同,前者在时间上相当于国内的准同生期岩溶^[6]。后来,有学者指出同生岩溶与准同生岩溶,只是早成岩岩溶的一种^[7-8]。近年来,国内学者也开始逐渐认可该观点,并开始用早成岩岩溶表示弱成岩、未成岩碳酸盐岩沉积物中发生的一切岩溶现象^[9-10]。因此,本文基于前人对古岩溶的分类成果,结合我国塔里木盆地断溶体研究成果,将古岩溶油气储层划分为早成岩岩溶储层、表生岩溶储层、埋藏岩溶储层以及断溶体四类。

1.1 早成岩岩溶储层

早成岩岩溶即沉积物脱离沉积介质后,进入地表沉积环境直至深埋藏之前所发生的岩溶作用,它不仅包括同生期岩溶、准同生期岩溶,还包括经过浅埋藏之后,暴露于地表所发生的早表生期岩溶。经过早成岩岩溶作用溶蚀改造形成的油气储层,即称为早成岩岩溶油气储层。目前,有关早成岩岩溶储层的研究实例较少,对于早成岩岩溶储层的研究主要集中在形成机制以及发育特征等方面。

1.1.1 形成机制

根据早成岩岩溶发育的物质基础,可将早成岩岩溶划分为早表生期岩溶和同生—准同生期岩溶,其中同生—准同生期岩溶,可根据其发生的地理环境,进一步划分为岛屿环境下形成的和海岸环境下形成的两种。

早表生岩溶,即未固结或弱固结岩石经过浅埋藏后,暴露在大气成岩环境下,受大气淡水淋滤溶蚀

所发生的岩溶作用,主要发生在大陆环境下,但大陆型早成岩岩溶实例较少,仅在美国佛罗里达州和我国四川盆地中二叠统茅口组地层中有所发现,“易碎晕”结构是其主要识别标志^[11]。

岛屿环境下的同生—准同生期岩溶,该类型岩溶实例较多,如马里亚纳群岛^[12]、大西洋巴哈马群岛^[13]等。该类型岩溶主要是由于海平面的下降,使未固结或弱固结的岩石,暴露在大气成岩环境中,受大气淡水和海水溶蚀改造所发生的岩溶作用(图2)。该类型岩溶最主要的特征为岩溶剖面上可见一个明显的大气淡水透镜体。透镜体边缘由于水动力作用混

合,水动力条件较好,往往成为储集空间的有利发育带,这也造就了该类型岩溶另一显著特征——侧向边缘洞穴发育。

海岸环境下的同生-准同生期岩溶,目前研究实例较多,如墨西哥尤卡坦半岛^[14-15]、美国佛罗里达半岛^[16]。该类型岩溶形成机制与岛屿环境下的同生-准同生期岩溶存在较多差异,如该类型岩溶的水动力条件除了大气淡水和海水,还会有异源补给的水源;该类型岩溶垂向上发育有一个大气淡水楔形体,而非透镜体^[9]。此外,该类型岩溶形成的储集空间以混合带管道为特征,而非边缘洞穴^[6]。

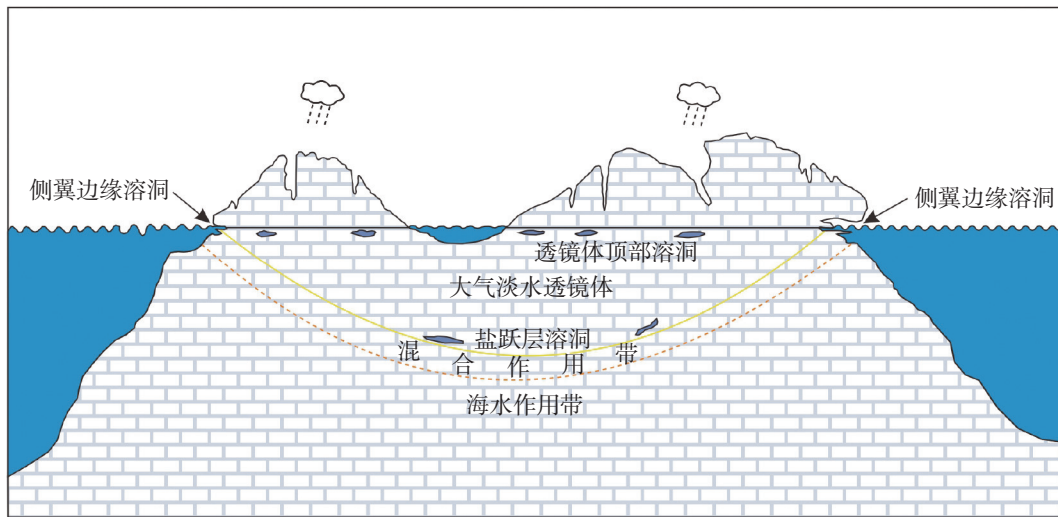


图2 岛屿环境早成岩岩溶模式图(据文献[6],[12]修改)

Fig. 2 Model diagram of eogenetic karst in island environment(modified from references [6],[12])

1.1.2 发育特征

通过对相关文献的调研,现将早成岩岩溶储层的发育特征归纳总结如下:①岩溶储层的形成往往与海平面的升降密切相关;②呈现明显的相控和层控特征^[17-18];③岩溶储层的储集空间以蜂窝状、海绵状孔洞为主;④溶洞多为小型充填残余溶洞,且溶洞规模较表生岩溶储层小的多;⑤早表生岩溶储层还会发育有典型的“易碎晕”^[6]。

1.2 表生岩溶储层

表生岩溶储层即经过深埋藏的可溶性岩石,由于构造抬升而暴露于地表,受到大气降水、地表水以及地下水的溶蚀改造形成的储层。该类型岩溶储层的储集空间以溶蚀孔、溶蚀缝、溶洞为主,其中溶洞包括落水洞和水平洞穴,较早成岩岩溶储层规模较

大,往往成为油气聚集的有利场所。由于表生岩溶的发育受古地貌影响显著,且其发育呈现明显的垂向分带性,因此,前人对表生岩溶储层的研究主要集中在古地貌恢复以及垂向分带等方面。

1.2.1 古地貌恢复

Kerans^[19]在对西得克萨斯州艾伦伯格组碳酸盐岩进行研究时,提出了岩溶储层的非均质性规律。随后,前人从诸多研究实例中证实^[20-23],造成该现象的主要原因是古地貌。古地貌对岩溶储层横向发育与分布的控制作用,使得古地貌恢复一直是古岩溶油气储层研究的重点。前人在古地貌恢复方面,进行了大量研究,并提出了多种古地貌恢复方法。目前常用的古地貌恢复方法主要有:印模法^[24]、残厚法^[25-26]、回剥和填平补齐法^[27]、沉积学分析法^[28]、层序地层学法^[29-31]、层拉平法^[32]、双界面法^[33]、井震结

合法^[34]以及新兴的地震地貌学方法^[35-38]等。

通过对各种古地貌恢复方法进行分析对比(表 1)发现,目前的古地貌恢复方法均具有一定优缺点和

适用范围,且仅能定性地、半定量地对古岩溶地貌进行恢复。对于如何精细定量地对古岩溶地貌进行恢复,仍有待进一步研究。

表 1 不同古地貌恢复方法对比 (据文献 [37]–[39] 修改)

Table 1 Comparison of different paleogeomorphologic restoration methods (modified from the previous studies[37]–[39])

古地貌恢复方法	优点	缺点
印模法	简单易操作,可精细恢复古地貌	仅能恢复出岩溶作用发生后的残余古地貌
残厚法	简便,直观真实,能较为精细的恢复古地貌	对于横向上剥蚀量差异较大的区域,应用效果较差,且未考虑到沉积压实作用对地层厚度的影响
回剥和填平补齐法	考虑了压实作用、海平面升降、构造运动等影响,可精细刻画古地貌	工作量较大,且地层压实参数难以确定
沉积学法	综合性强、简单直白	对各种地质图件依赖性较大,工作较为繁琐,不易精细刻画古地貌单元
层序地层学法	选择的上覆基准面相对等时	粗略恢复古地貌,很难精细刻画古地貌单元;工区较大时,难以选择合适的基准面
层拉平法	直观、立体,考虑了后期构造运动和差异压实作用的影响	适用范围有限,地层去压实校正难度大
双界面法	直观、准确	对钻井、岩性等基础资料要求较高,还需要对研究区的沉积、构造背景等进行精细调研,操作过程较为繁琐且不适用于较大工区
井震结合法	直观准确,能真实反映地下地貌形态	地震资料的采集和处理,受客观条件限制,人为主观因素影响大
地震地貌学法	能够实现古地貌的定量恢复	对地震资料的分辨率要求较高,仅适用于较“新”地层的古地貌恢复,对于碳酸盐岩古地貌恢复缺少相应的实践

1.2.2 垂向分带

作为古岩溶发育的最显著特征之一,古岩溶垂向分带一直是古岩溶研究的重点^[40-41]。学者们从径流的强弱、岩溶空间形态、岩溶发育强度、水动力作用特征等角度出发,提出了多种古岩溶垂向分带方案(表 2)。尤其在水动力作用特征方面,前人进行了大量研究与实践,提出了多种垂向分带方案^[42-46],将岩溶垂向上划分为 2~6 个带不等。

总的来看,各种分带方案虽划分依据、分带定名不同,但均存在一个显著的问题,即带与带之间的界线不明确。对于表生岩溶,我们只能从有限的岩芯资料、FMI 成像测井资料^[48]出发,对垂向分带进行一个大致的划分。但对于如何定量准确的划分出各垂向分带之间的界线,仍是表生岩溶储层研究中亟需解决的问题。

从油田实际可行性来看,本文倾向于陈胜等的分类方案,即将古岩溶垂向上划分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带以及深部缓流带。表层风化带发育在不整合面附近,长期暴露地表,遭受风化淋滤,岩石破碎。岩性多见为岩溶角砾岩,质地松散,反映古潜山风化壳经历的风化淋滤作用。储集空间

以角砾孔隙为主,物性较好。测井自然伽马曲线呈锯齿状,GR 值较垂直渗流带较高。成像测井图像显示为“暗—亮—暗”条带状模式^[49]。垂直渗流带位于表层风化带之下、潜水面之上,主要地质作用以地表水垂向渗流为主。相比上覆表层风化带,裂缝发育程度增大。地表水主要沿着裂缝发生垂向溶蚀形成裂缝—孔隙型、裂缝—孔洞型储集空间。洞穴呈纵向展布,横向规模较小。成像测井上,为垂直线状与暗色斑状组合模式。水平潜流带位于潜水面附近,主要地质作用以地下水的水平溶蚀为主。储集空间类型以水平溶洞为主,洞穴规模较大,呈横向展布。钻遇洞穴时扩径,且三孔隙度曲线“跳跃”明显。成像测井中水平潜流带呈现出水平线状—层状与斑状组合模式。深部缓流带为最低潜水面以下,几乎无任何溶蚀作用的区域,储集空间几乎不发育。测井曲线与致密灰岩相似,无异常现象。成像测井整体显示为亮色块状模式偶见线状或斑状特征。

1.3 埋藏岩溶储层

埋藏岩溶储层指处于深埋藏期的可溶性岩石,受到深部酸性流体(压释水、有机酸、硫酸盐热还原作用相关流体)或热液溶蚀改造所形成的油气储层。

外, 该类型岩溶作用还会形成一些与热液活动相关的矿物如畸形白云石、闪锌矿、萤石等^[50]。本文结合我国四川盆地、塔里木盆地埋藏岩溶储层研究成果, 从识别标志以及发育特征方面, 对我国埋藏岩溶储层的研究进展, 进行了归纳总结。

1.3.1 识别标志

(1) 矿物学标志 不同类型流体导致的埋藏岩溶作用, 其形成的标志矿物也不同。对于经硫酸盐热还原反应相关流体溶蚀改造而成的埋藏岩溶储层, 储层孔隙中普遍含有金属硫化物, 如黄铁矿, 此外在部分溶蚀孔隙中还会有硫磺的存在^[51-52]。前人研究指出, 溶蚀孔洞之间沥青的充填以及溶蚀裂缝中自生石英的存在, 均能说明储层经过有机酸的溶蚀改造^[53]。热液在对储层进行溶蚀改造的过程中, 往往会伴生一系列热液矿物, 如马鞍状白云石^[54]、萤石^[55]、石英、重晶石等矿物^[56]均可作为热液活动的标志。

(2) 岩石学标志 热褪色现象以及热破裂现象是热液岩溶两个最主要的岩石学特征。热褪色即在热液作用下岩石颜色由深变浅的现象。热液破裂现象, 表现为岩石在高温高压流体作用下热膨胀导致的破碎角砾化^[57]。此外, 硅化硅质岩的发育, 也可作为热液岩溶作用的标志。

(3) 包裹体标志 经硫酸盐热还原反应相关流体溶蚀改造而成的埋藏岩溶储层, 常含有大量气烃包裹体, 包裹体中 H_2S 占比较高。矿物流体包裹体的均一温度能较好地指示矿物形成时的环境温度和埋藏状况, 包裹体均一温度明显高于所在地质历史中所经历的最高温度, 往往是埋藏岩溶作用发生的重要标志^[55]。

(4) 地球化学标志 前人通过对塔里木盆地埋藏岩溶储层的研究, 发现了埋藏岩溶储层诸多地球化学特征, 现将其归纳如下: ①与围岩相比, 埋藏溶洞充填物的 $\delta^{18}O$ 值偏负^[54]; ② $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值偏高, 这主要是由于深埋环境下, 深部流体通过地层时能够使放射性的锶(^{87}Sr)得到富集^[58]; ③Fe、Mn 元素增加^[59]; ④稀土元素显示明显的正 Eu 异常; ⑤氧同位素小于 5‰, 碳同位素为正值^[60]。

1.3.2 发育特征

从目前我国四川盆地、塔里木盆地埋藏岩溶储层研究实例来看, 埋藏岩溶储层主要具有以下发育

特征: ①埋藏越深, 越靠近深部流体源区, 越易受埋藏流体影响, 埋藏岩溶储层更为发育^[53]; ②埋藏溶蚀优先沿着晶体边缘、裂缝以及节理方向发育, 优先扩溶原有孔洞缝^[61]; ③与硫酸盐热还原反应相关的埋藏岩溶储层, 多发生在含石膏以及其他硫酸盐矿物的地层中; ④流体沿缝合线或裂缝向周围呈斑状溶蚀, 沿层理面发生顺层溶蚀^[62]; ⑤储层发育不受不整合面控制, 主要沿断裂、裂缝以及早期岩溶作用形成的储集空间发育, 对先存疏导体系具有依赖性^[63]; ⑥垂向上, 储层发育具有穿层性, 不局限于某一层位; ⑦在地震反射特征上, 表现为串珠状反射, 地震振幅明显高于围岩^[64]。

1.4 断溶体

断溶体, 即碳酸盐岩受多期次构造挤压作用后, 沿深断裂带发育一定规模的破碎带, 经多期岩溶水沿断裂下渗或局部热液上涌致使破碎带内断裂、裂缝被溶蚀改造而形成的柱状储集体^[65]。断溶体这一新概念的提出, 一方面为我国塔里木盆地下一步油气勘探提供了新思路, 另一方面, 开辟了古岩溶油气储层研究的一个新领域。作为近年来古岩溶油气储层研究的热点, 前人在发育特征、形成机制、断溶体刻画等方面对断溶体进行了大量研究, 并取得了一系列成果。

1.4.1 断溶体发育特征与形成机制

断溶体圈闭是在复杂条件下形成的一种特殊类型的岩溶缝洞型圈闭, 其与常规表生岩溶缝洞油气藏存在明显差异, 因而也表现出不同的发育特征。通过调研我国塔里木盆地断溶体研究成果, 总结认为断溶体主要呈现以下发育特征: ①沿断裂带分布, 受断裂带控制明显^[66]; ②平面上, 沿断裂带呈条带状分布, 且具有明显的分段性^[67]; ③垂向上, 具有不规则性和穿层性, 并具有一定的油气柱高度, 且自断裂带向两侧岩溶储集空间发育逐渐变差^[68]; ④受岩溶水选择性溶蚀和裂隙发育程度的影响, 断溶体油藏内部结构极其复杂, 储集空间纵横向非均质性非常强^[69]。

对于断溶体的形成机制, 前人从宏观和剖面两个角度上, 对其进行了剖析。宏观上, 吕海涛等^[70]认为断溶体的形成主要有两方面的成因机制: 一是走滑断裂带构造破裂增容机制; 二是埋藏流体对其溶蚀、胶结带来的储集空间调整改造机制。鲁新便等^[71]认为断溶体油藏的形成机理为: 多期继承性断

裂+多期岩溶改造作用+持续循环的岩溶水系+合适的油气运聚条件;剖面上,程洪等^[66]指出溶蚀作用首先发生在断溶体核部形成规模较大、储渗能力好的洞穴型储集体,向断溶体边部由于应力逐渐减弱、裂缝密度降低,溶蚀作用逐渐减弱,发育溶蚀孔洞型储集体,最外围发育有裂缝-孔洞型储集体。吕艳萍

等^[72]指出断溶体储层从核部到边部整体呈现出:溶蚀程度逐渐变弱、储集体发育程度逐渐变差的趋势。总的来看,断溶体的发育机制,宏观上主要包括多期构造运动和多期岩溶作用,从剖面上来看,断溶体从核部到边部,呈现出裂缝密度降低,溶蚀作用逐渐减弱,储集体发育程度逐渐变差的趋势(图 4)。

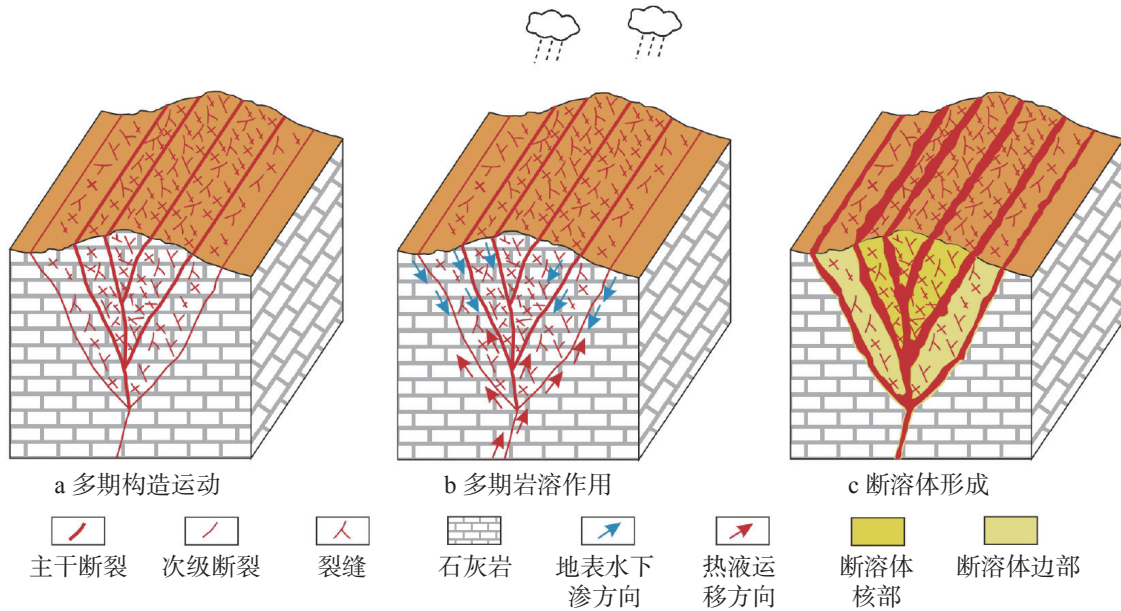


图 4 断溶体形成机制与发育特征(据文献 [66] 修改)

Fig. 4 Formation mechanism and development characteristics of fault-karst (modified from reference [66])

1.4.2 断溶体刻画

断溶体的刻画一直是断溶体研究的热点,目前对于断溶体刻画的研究,主要集中在利用各种地震属性来实现对断溶体的精细刻画。最初,主要应用地震体正演^[73]以及相干、曲率等常规断裂检测属性^[74]对断溶体油藏进行刻画与预测。随着断溶体刻画研究的不断深入,油气地质学家们认识到,结构张量属性对断溶体的刻画能力要优于常规断裂检测属性。自此,结构张量属性开始取代常规断裂检测属性逐渐成为断溶体刻画研究的主要手段。例如,李海英等^[75]利用梯度结构张量属性刻画断溶体轮廓;文山师等^[76]利用梯度结构张量属性识别断溶体边界,结合不同门槛值的 AFE 属性和反演数据对断溶体内部结构进行刻画。

近年来,随着地球物理学的不断发展,一些新技术、新方法开始应用到断溶体刻画研究中来,如张文彪等^[77]创新性地将构型分类研究应用到断溶体刻画研究中来,将断溶体划分为走滑断裂影响带、断溶体、

断溶体内部缝洞带、洞内充填四个层级。然后对不同层级优选表征技术,形成基于井—震拟合、逐级解剖的断溶体构型表征技术流程。

2 古岩溶油气储层发育主控因素

古岩溶作用是一个十分漫长、复杂的过程,会受到各种各样因素的影响,且不同地区、不同类型古岩溶其主控因素也不同。这些因素概括起来可以分为两类:内因和外因。内因主要包括岩性、原生孔隙发育程度、岩石结构与构造、泥质以及酸性不溶物含量、裂缝等;外因主要包括:沉积相、海平面升降、古地貌、构造运动、古气候、微生物等。

2.1 内 因

(1)岩性 前人在研究岩溶的定义时,就曾指出岩溶是地表水以及地下水对可溶性岩石的改造。可见可溶性岩石是岩溶储层发育的物质基础,岩性是制约古岩溶发育的关键。目前所发现的岩溶储层主

要发育在碳酸盐岩地层中,不同类型碳酸盐岩由于其化学成分以及结构组分的差异,岩溶储集空间的发育程度也不同。就石灰岩和白云岩来说,在深埋藏阶段,岩溶作用在石灰岩中比较发育;当出露地表时,岩溶作用则在白云岩中较为发育^[78]。

(2)原生孔隙发育程度 原生孔隙作为早期岩溶作用发生的重要通道,其发育程度对于岩溶储层,尤其是早成岩岩溶储层的发育至关重要。就碳酸盐岩类型来看,生物灰岩较其他类型灰岩往往生物体腔孔、生物骨架孔等原生孔隙较为发育,有利于岩溶作用的发生和岩溶储集空间的形成。

(3)岩石结构与构造 岩石的结构与构造对岩溶作用的影响主要体现在三个方面:①岩石的结构影响着岩溶作用发生时的接触面积,如颗粒灰岩与泥晶灰岩,泥晶灰岩由于其晶粒较细,岩溶作用发生时与酸性流体的接触面积大,因而其岩溶储集空间较颗粒灰岩更为发育;②岩石的结构影响着岩石中裂缝的发育,邬长武等^[78]在对塔中地区古岩溶进行研究时,就曾指出灰泥石灰岩由于层薄、致密易形成裂隙、节理,因此岩溶作用较发育;③岩石的构造对原生孔隙的发育程度也会有一定的影响。如鸟眼构造的发育,会极大程度的提高原生孔隙的发育程度,为岩溶作用的发生提供了良好的通道。

(4)泥质以及酸性不溶物含量 泥质以及不溶物如黄铁矿、石英等的存在不利于岩溶作用的发生,其含量越高,越不利于岩溶储集空间的形成,因而泥质灰岩、泥质白云岩岩溶储层的实例,比较少见。

(5)裂缝 裂缝作为岩溶作用发生的重要通道,其发育程度与岩溶作用息息相关。从成岩作用阶段来看,埋藏期岩石经过上覆地层的压实,其原生连通孔隙较少,裂缝往往成为了酸性流体与热液的优势运移通道,其发育与否成为制约埋藏岩溶储层和“断溶体”发育与分布的关键。此外,裂缝不仅是岩溶作用发生的通道,其本身也是一种重要的储集空间类型。

2.2 外 因

2.2.1 沉积相

沉积相对于岩溶储层发育的影响主要体现在两方面,一方面,沉积相控制着岩性的展布,而岩性是岩溶储层发育的物质基础;另一方面,潮坪、颗粒滩、生物礁等沉积相,由于其经常暴露在海面之上,更易

受到大气淡水的溶蚀改造,进而岩溶作用较其他沉积相更为发育。如杨明磊等^[18]就曾指出颗粒滩控制着川南地区中二叠统茅口组早成岩期岩溶储层的发育。

2.2.2 海平面升降

海平面下降,使未成岩或弱成岩岩石暴露于大气成岩环境中,这是早成岩岩溶发育的关键,且海平面下降时间越长,这种类型的岩溶作用发育越明显。此外,海平面的升降会使淡水与海水发生混合。一方面,海水与淡水的混合能提高淡水的侵蚀能力,另一方面,海水与淡水的混合带,水动力条件较强,有利于洞穴等储集空间的形成。

2.2.3 古地貌

古地貌控制着岩溶作用发生的关键——古水流的流向与分布,从古地貌的角度来看,古水流自岩溶高地向岩溶洼地流动。其中岩溶高地岩溶作用以垂直渗流为主,同时也发育有相当规模的水平潜流带;对于较陡的岩溶斜坡来说,古水流的下切作用较为明显,垂直渗流较为发育,对于比较缓的岩溶斜坡来说,古水流的侧向侵蚀作用较为明显,岩溶作用以水平潜流为主;而岩溶洼地,由于水动力作用较弱,岩溶作用发育较差^[78]。

2.2.4 构造运动

构造运动作为表生岩溶发生的关键,其对岩溶储层发育的影响主要体现在以下五个方面:①区域构造运动往往会造成海平面的升降,影响着区域的水文地质条件,进而影响着岩溶储层的发育;②构造运动还会造成部分地层的抬升,使其暴露地表,更易遭受岩溶作用,形成表生岩溶储层^[79];③构造运动会改造古地貌格局,影响古水流的分布与流向,进而影响着岩溶储层的发育与分布;④构造运动还会形成断层和裂缝,为岩溶作用的发生提供渗流通道,有助于岩溶储层的形成^[80];⑤构造运动往往伴生有大规模的火山活动,而火山活动产生的热液往往有助于埋藏岩溶作用的发生以及埋藏岩溶储层的形成。

2.2.5 古气候

岩溶作用的发生离不开水,潮湿的气候会带来大量的降水,为岩溶作用提供了丰富的水动力条件,

从而有利于岩溶作用的发生。相反,对于气候比较干旱的区域,其地表水以及地下水都比较匮乏,缺少发生岩溶作用的水动力条件,往往不利于岩溶储层的形成^[81]。

除了上述因素外,微生物^[82]、不整合面、埋深、岩浆活动等因素也会对岩溶储层的发育产生影响。总的来看,影响岩溶储层发育的因素众多,不同地区、不同类型岩溶储层的发育,其主控因素也不完全相同。在实际工作中,我们可以通过对研究区岩溶储层发育主控因素的分析,来预测研究区岩溶储层有利发育带,从而有效的指导油气勘探开发。

3 古岩溶油气储层预测

由于岩溶储层的发育具有明显的横向非均质性,因此,岩溶储层预测一直是古岩溶油气储层研究中的重点与难点。前人在岩溶储层预测方面,进行了大量研究,并针对不同类型的岩溶储层提出了不同的预测方法。

3.1 早成岩岩溶储层

早成岩岩溶作用具有明显的层控和相控特征,因此前人对于早成岩岩溶储层的预测主要集中在其发育的主控因素方面,即层序和沉积相。例如,刘忠宝等^[83]揭示了不同级别层序界面对塔里木盆地台地边缘碳酸盐岩同生期岩溶的控制作用,对于正确预测早成岩岩溶储层的发育,具有重要的指导意义;罗冰^[84]、王振宇^[85]等,在对我国四川盆地、塔里木盆地早成岩岩溶储层进行研究时,指出潮坪、生物礁、颗粒滩相,往往是早成岩岩溶储层发育的有利相带,并基于此对早成岩岩溶储层的分布进行了有效预测。总的来看,早成岩岩溶储层的预测目前主要集中在沉积相方面,尤其是随海平面升降容易暴露在大气成岩环境下的沉积相带,往往是早成岩岩溶储层的有利发育区。

3.2 表生岩溶储层

由于表生岩溶储层实例较多,前人对该类型岩溶储层的预测进行了大量研究,从地质、测井以及地震等角度出发,提出了多种表生岩溶储层预测方法。

地质方面主要是基于表生岩溶储层发育的主要控制因素(古地貌、沉积相、岩相、裂缝等)中的一种因素或多种因素,对岩溶储层的有利发育带进行预

测。对于表生岩溶储层来说,古地貌是影响其发育的最主要因素之一,因此,基于古地貌对表生岩溶储层进行预测的实例较多。例如,罗冰等^[84]基于古地貌对川中古隆起灯影组岩溶储层的分布进行了预测,并指出岩溶残丘—岩溶高地为储层发育最有利的“甜点”区;曹红霞等^[86]根据岩溶古地貌与古沟槽网络分布规律及储层储集空间分布特征,指出斜坡带、残丘区以及岩溶高地等地貌单元转换带是鄂尔多斯盆地东南部表生岩溶储层的有利发育带。

近年来,随着测井技术的不断发展,一些新的测井技术(如成像测井、核磁共振测井)的涌现,为古岩溶油气储层的预测提供了新手段。越来越多的学者开始将不同的测井技术,应用到岩溶储层的预测中来。例如,冯庆付等^[49]针对四川盆地茅口组岩溶储层,提出一种电成像测井刻度常规测井识别岩溶发育带的新方法;谭茂金等^[87]利用核磁共振测井技术,对车古 20 潜山表生岩溶储层的分布进行了预测等。

地震资料凭借其较高的横向分辨率,一直是岩溶储层预测的一种强有力的手段。前人在这方面,也进行了大量的研究,提出了多种技术方法。例如,曹鉴华等^[88]利用包络属性以及相干属性的融合显示,对塔里木盆地阿克库勒凸起表生岩溶储层的分布进行了预测;邬长武等^[89]提出通过对不同储集空间的地震物理正演模拟,对表生岩溶储层进行预测;Alessandro 等^[90]利用岩溶特征与连续性、曲率、分频地震属性之间的相关性,通过神经网络,对伊拉克 Zubair 油田表生岩溶储层的分布展开了预测。

3.3 埋藏岩溶储层

从我国四川盆地和塔里木盆地的研究实例来看,对于埋藏岩溶储层的预测,主要集中在运移通道和流体分布两个方面。运移通道方面,前人主要通过测井、地震资料,明确早期岩溶储集空间、不整合面、断裂等优势运移通道的分布,进而对埋藏岩溶储层的分布进行有效预测。流体分布方面,针对不同类型流体形成的埋藏岩溶储层,前人提出了不同的预测方法。例如,朱光有等^[91]参考储层厚度、孔隙度以及储层埋深情况和膏盐发育情况,对我国四川盆地硫酸盐热还原作用相关埋藏岩溶储层的分布进行了预测分析;阮壮等^[92]利用埋藏条件下方解石热力学平衡,对塔河油田埋藏热液岩溶储层的分布进行了

预测。

3.4 断溶体

鉴于断溶体与断裂之间的密切关系,前人对于断溶体的预测多是基于断裂识别的基础上,结合各种地震属性对断溶体相关储层进行预测。例如,刘群等^[93]应用精细相干及蚂蚁体技术进行断裂检测,并在此基础上叠合振幅变化率属性,对塔河油田南部断溶体开展了预测研究;文山师等^[76]利用相干加强属性对顺北油田断溶体储层进行了预测,并指出空腔断裂面为主要优质储层的分布位置;徐红霞等^[94]利用相干、曲率以及纹理等几何类属性精细刻画工区断裂系统,利用多属性融合技术预测断溶体的连通性,利用频域类属性预测有利储层。除了基于地震属性对断溶体储层进行预测外,断溶体油气藏微生物异常特征也可以作为一种新的预测方法,应用到断溶体储层预测中来^[95]。

目前岩溶储层的预测主要依赖于地震资料,但岩溶储层的非均质性决定了紧靠单一技术或方法,难以实现对岩溶储层的精准预测。近年来,越来越多的学者开始将地质、测井、地震资料以及油气人工智能领域的一些新技术、新方法,综合运用起来,以求对岩溶储层进行精准预测。例如,Bigoni^[96]等针对碳酸盐岩岩溶储层,提出一种基于地质、测井以及地震属性分析的全集成机器学习 workflow,有效指导岩溶储层的预测。相信未来,地质—测井—地震综合预测方法将会成为岩溶储层预测的主流,并且随着地球物理学的不断发展以及人工智能领域的不断进步,越来越多的新方法、新技术,将会应用到岩溶储层预测中来。

4 结论与建议

(1)早成岩岩溶储层的研究多集中于其形成机制和发育特征两个方面,对于早层岩岩溶储层的预测也局限于主控因素方面,对于如何利用测井、地震资料对其分布进行预测,缺少相应实践,仍有待进一步研究。总的来看,早成岩岩溶储层研究实例较少,但由于其形成时岩石往往具有良好的孔渗性,因此具备形成良好油气储层的潜力,应是未来古岩溶油气储层研究的重点;

(2)表生岩溶储层研究主要集中在古地貌恢复和垂向分带两个方面。鉴于目前各种古地貌恢复方

法均具有一定优缺点和适用范围,古岩溶地貌恢复的关键是要结合研究区资料找寻最合适的古地貌恢复方法。也可考虑综合运用多种方法,弥补方法之间的不足,以求准确地对研究区古地貌进行恢复。同时,目前的古地貌恢复方法,仅能定性地、半定量地对古岩溶地貌进行恢复。如何定量地对古岩溶地貌进行恢复,将是下一步研究的重点;

垂向分带虽划分方案众多,但从实际可行性来看,本文倾向于将表生岩溶垂向上划分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带以及深部缓流带。此外,在进行垂向分带时,我们可以将测井、地震资料与岩芯资料结合起来,通过多井综合评价以及聚类分析等技术,定量准确地划分出各分带之间的界线;

(3)从岩溶发育期次来看,埋藏岩溶作用往往叠加在早成岩岩溶与表生岩溶之上,是对早期岩溶储层的进一步溶蚀改造,往往会形成有利的岩溶储层,未来应进一步加强有相关研究,特别是对于受有机酸影响的埋藏岩溶储层而言,其研究实例较少,应是下一步埋藏岩溶储层研究的重点;

(4)断溶体的刻画和预测主要依赖于地震资料,受地震资料分辨率影响显著。一方面我们可以通过对地震资料进行处理,来提升地震资料的可靠性,另一方面则需要不断优选敏感属性,以求对断溶体进行准确的刻画与预测;

(5)岩溶储层发育影响因素众多,仅靠单一的地质或地震手段难以实现对岩溶储层的精准预测。基于地质—测井—地震的综合预测方法,应是未来岩溶储层预测方法的主流。并且随着地球物理学以及油气人工智能领域的不断发展,越来越多的新方法、新技术,将会应用到岩溶储层预测中来。

参考文献

- [1] Nakashima K. Petroleum Potential in the East Siberian Region[J]. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, 2005, 70(2): 132-141.
- [2] Bliefnick D M, Belfield W C. Karst-Related Diagenesis and Reservoir Development in the Arbuckle Group, Wilburton Field, Oklahoma[J]. *AAPG Bulletin*, 1992: 76.
- [3] Craig D H. Caves and other features of Permian karst in San Andres dolomite, Yates field reservoir, west Texas[M]. *Paleokarst*. Springer, New York, 1988: 342-363.
- [4] 张学丰,李明,陈志勇,姜华,唐俊,刘波,高计县,赫云兰.塔北哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征及主要岩溶期次[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 815-826.

- ZHANG Xuefeng, LI Ming, CHEN Zhiyong, JIANG Hua, TANG Jun, LIU Bo, GAO Jixian, HE Yunlan. Characteristics and karstification of the Ordovician carbonate reservoir, Hala-hatang area, northern Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 815-826.
- [5] Klimchouk A. Morphogenesis of hypogenic caves[J]. *Geomorphology*, 2009, 106(1-2): 100-117.
- [6] 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 李凌, 刘宏. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义[J]. *古地理学报*, 2015, 17(4): 441-456.
- TAN Xiucheng, XIAO Di, CHEN Jingshan, LI Ling, LIU Hong. New advance and enlightenment of eogenetic karstification[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(4): 441-456.
- [7] Jennings J N. Syngenetic karst in Australia[J]. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1968(5): 41-100.
- [8] Frank E F, Mylroie J, Troester J, Alexander C E, Carew L J. Karst development and speleogenesis, Isla de Mona, Puerto Rico[J]. *Journal of Caves and Karst Studies*, 1998, 2(60): 73-83.
- [9] 淡永, 梁彬, 曹建文, 张庆玉, 郝彦珍, 李景瑞. 碳酸盐岩早成岩岩溶作用及油气地质意义[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(2): 126-135.
- DAN Yong, LIANG Bin, CAO Jianwen, ZHANG Qingyu, HAO Yanzhen, LI Jingrui. Eogenetic karstification in carbonatite and its significance for hydrocarbon geology[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 126-135.
- [10] 陈红汉, 吴悠, 朱红涛, 鲁子野, 曹自成, 云露. 塔中地区北坡中—下奥陶统早成岩岩溶作用及储层形成模式[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1231-1246.
- CHEN Honghan, WU You, ZHU Hongtao, LU Ziyue, CAO Zicheng, YU Lu. Eogenetic karstification and reservoir formation model of the Middle-Lower Ordovician in the northeast slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 37(10): 1231-1246.
- [11] 肖笛. 海相碳酸盐岩早成岩期岩溶及其储层特征研究: 以中国西部三大盆地为例[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- Xiao Di. Research on eogenetic karst of marine carbonate and its reservoir in the three major basins, western China [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [12] Mylroie J E, Jenson J W, Taborosi D, Jocson J M U, Vann D T, Wexel C. Karst features of Guam in terms of a general model of carbonate island karst[J]. *Journal of Caves and Karst Studies*, 2001, 63(1): 9-22.
- [13] Mylroie J E, Carew J L, Vacher H L. Karst development in the Bahamas and Bermuda[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1995, 300: 251-267.
- [14] Back W, Hanshaw B B, Herman J S, Van Driel J N. Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico[J]. *Geology*, 1986, 14(2): 137-140.
- [15] Smart P L, Beddows P A, Smith S, Whitaker F F. Cave Development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2006, 404(8): 105-128.
- [16] Florea L J, Vacher H L. Eogenetic Karst Hydrology: Insights from the 2004 Hurricanes, Peninsular Florida[J]. *Ground Water*, 2010, 45(4): 439-446.
- [17] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 潘文庆, 乔占峰. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1312-1321.
- NI Xinfeng, ZHANG Lijuan, SHEN Anjiang, PAN Wenqing, QIAO Zhanfeng. Paleo-karstification types, karstification periods and superimposition relationship of Ordovician carbonates in northern Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1312-1321.
- [18] 杨明磊, 诸丹诚, 李涛, 李海平, 黎霆, 邹华耀. 川南地区中二叠统茅口组颗粒滩对早成岩期岩溶储层的控制[J]. *现代地质*, 2020, 34(2): 356-369.
- YANG Minglei, ZHU Dancheng, LI Tao, LI Haiping, LI Ting, ZOU Huayao. Control of Eogenetic Karst Reservoir by Shoals in Middle Permian Maokou Formation, Southern Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 2020, 34(2): 356-369.
- [19] Kerans. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of West Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(10).
- [20] Carr T R, Anderson N L, Franseen E K. Paleogeomorphology of the Upper Arbuckle Karst Surface: Implications for Reservoir and Trap Development in Kansas: Abstract[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 3: 117.
- [21] Han C. Palaeogeomorphology and its controlling effect on karst reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2017(4): 2-5.
- [22] 朱静, 李文厚, 韩永林, 袁珍, 李卫成. 陇东地区前侏罗纪古地貌及油藏成藏规律研究[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1229-1237.
- ZHU Jing, LI Wenhui, HAN Yonglin, HAN Yonglin, YUAN Zhen, LI Weicheng. Research on Palaeogeomorphic Features of Pre-Jurassic and Accumulation Regularity of Oil Reservoir in the Area of Eastern Gansu, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1229-1237.
- [23] 张银德, 周文, 邓昆, 王彩丽, 王勇, 蒙晓灵. 鄂尔多斯盆地高桥构造平缓地区奥陶系碳酸盐岩岩溶古地貌特征与储层分布[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 757-767.
- ZHANG Yinde, ZHOU Wen, DENG Kun, WANG Caili, WANG Yong, MENG Xiaoling. Paleogeomorphology and reservoir distribution of the Ordovician karstified carbonate rocks in the structurally-gentle Gaoqiao area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 757-767.
- [24] 苗钱友, 朱筱敏, 李国斌, 苗钱友, 郭洪明, 杨勤林, 张静, 张亚军, 洪亮. 滨里海盆地M区块晚石炭世古地貌恢复与白云岩储层预测[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(7): 871-879.
- MIAO Qianyou, ZHU Xiaomin, LI Guobin, MAO Qianyou, GUO Hongming, YANG Qinlin, ZHANG Jing, ZHANG Yajun, HONG Liang. Paleogeomorphology Recovery and Reservoir Prediction of Upper Carboniferous in M Block, Pre-Caspian Basin[J]. *Earth Science*, 2014, 39(7): 871-879.

- [25] 代金友, 何顺利. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系古地貌研究[J]. *石油学报*, 2005(03): 37-39.
Dai Jinyou, He Shunli. Ordovician paleokarst landform of Central Gas Field in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005(03): 37-39.
- [26] 何江, 沈昭国, 方少仙, 侯方浩, 傅锁堂, 徐黎明, 马振芳, 阎荣辉. 鄂尔多斯盆地中部前石炭纪岩溶古地貌恢复[J]. *海相油气地质*, 2007(2): 8-16.
HE Jiang, SHEN Zhaoguo, FANG Shaoxian, HOU Fanghao, FU Suotang, XU Liming, MA Zhenfang, YAN Ronghui. Restoration of Pre-Carboniferous Palaeokarst Landform in Central Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007(2): 8-16.
- [27] 姜正龙, 邓宏文, 林会喜, 王林. 古地貌恢复方法及应用: 以济阳坳陷桩西地区沙二段为例[J]. *现代地质*, 2009, 23(5): 865-871.
JIANG Zhenglong, DENG Hongwen, LIN Huixi, WANG Lin. Methods and Application of Paleo-geomorphologies Rebuilding: An Example of the Second Member of Shahejie Formation Zhuangxi Area, Jiyang Depression[J]. *Geoscience*, 2009, 23(5): 865-871.
- [28] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义: 以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. *成都理工大学学报*, 2001(3): 260-266.
ZHAO Junxing, CHEN Hongde, SHI Zhiqiang. The way and implications of rebuilding paleogeomorphology: Taking the research of paleogeomorphology of the Ordos Basin before Jurassic deposition as example[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2001(3): 260-266.
- [29] 宋国奇, 徐春华, 樊庆真, 魏艳萍, 孔凡顺. 应用层序地层学方法恢复加里东期古地貌: 以济阳坳陷沾化地区为例[J]. *石油实验地质*, 2000(4): 350-354.
SONG Guoqi, XU Chunhua, FAN Qingzhen, WEI Yanping, KONG Fanshun. Sequence stratigraphy applied in the restoration of the caledonian paleogeomorphology-A case study in Zhanhua area, the Jiyang depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2000(4): 350-354.
- [30] 王家豪, 王华, 赵忠新, 潘明年, 于哲. 层序地层学应用于古地貌分析: 以塔河油田为例[J]. *地球科学*, 2003(4): 425-430.
WANG Jiahao, WANG Hua, ZHAO Zhongxin, PAN Mingnian, YU Zhe. Sequence Stratigraphy in Paleogeomorphology Analysis: An Example from Tahe Oilfield[J]. *Earth Science*, 2003(4): 425-430.
- [31] 赵俊兴, 陈洪德, 向芳. 高分辨率层序地层学方法在沉积前古地貌恢复中的应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003(1): 76-81.
ZHAO Junxing, CHEN Hongde, XIANG Fang. The Possibility of Rebuilding Paleogeomorphology Before Basin Deposition by High-Resolution Sequence Stratigraphy[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003(1): 76-81.
- [32] 李家强. 层拉平方法在沉积前古地貌恢复中的应用: 以济阳坳陷东营三角洲发育区为例[J]. *油气地球物理*, 2008, 6(2): 46-49.
LI Jiaqiang. Application of bedding flattening in the process of rebuilding paleogeomorphology before basin deposition: A case study in Dongying sag, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geophysics*, 2008, 6(2): 46-49.
- [33] 闫海军, 何东博, 许文壮, 王国亭, 冀光, 田国庆, 霍俊洲, 马洪浩, 黄航娟, 谢题志. 古地貌恢复及对流体分布的控制作用: 以鄂尔多斯盆地高桥区气藏评价阶段为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(12): 1483-1494.
YAN Haijun, HE Dongbo, XU Wenzhuang, WANG Guoting, JI Guang, TIAN Guoqing, HUO Junzhou, MA Honghao, HUANG Hanjuan, XIE Tizhi. Paleotopography restoration method and its controlling effect on fluid distribution: a case study of the gas reservoir evaluation stage in Gaoqiao, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1483-1494.
- [34] 加东辉, 徐长贵, 杨波, 杨香华, 吴小红, 周心怀, 滕玉波, 赖维成. 辽东湾辽东带中南部古近纪古地貌恢复和演化及其对沉积体系的控制[J]. *古地理学报*, 2007(2): 155-166.
JIA Donghui, XU Changgui, YANG Bo, YANG Xianghua, WU Xiaohong, ZHOU Xinhui, TENG Yubo, LAI Weicheng. Paleogene palaeogeomorphology reconstruction and evolution and its control on sedimentary systems in central southern Liaodong Zone, Liaodongwan Bay[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007(2): 155-166.
- [35] Wood L J. Quantitative seismic geomorphology and reservoir architecture of clastic depositional systems; the future of uncertainty analysis in exploration and production[J]. *AAPG Bulletin*, 2003: 182-183.
- [36] Wood L J. Quantitative Seismic Geomorphology of Pliocene and Miocene Fluvial Systems in the Northern Gulf of Mexico, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(9): 713-730.
- [37] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 池英柳, 杨雨, 鲁卫华, 王海真, 李秋芬. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 949-960.
JIANG Qingchun, HU Suyun, WANG Zecheng, CHI Yingliu, YANG Yu, LU Weihua, WANG Haizhen, LI Qiufang. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 949-960.
- [38] 苏中堂. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系马家沟组沉积相与古岩溶储层特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
SU Zhongtang. Sedimentary facies and Character of palaeokarst cust reservoir in Majiagou Formation in Ordovician, Tabamiao area, Ordos [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [39] 刘聪颖. 川中GST构造灯影组顶部岩溶古地貌恢复及其对储层的影响研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
LIU Congying. Karst palaeogeomorphology restoration and its influence on reservoirs in the top of Dengying Formation of GST structure, central Sichuan Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.

- [40] 王俊明, 肖建玲, 周宗良, 梁宝琴. 碳酸盐岩潜山储层垂向分带及油气藏流体分布规律[J]. *新疆地质*, 2003(2): 210-213.
WANG Junming, XIAO Jianling, ZHOU Zongliang, LIANG Boqin. Vertical zoning and fluid distribution for carbonate rock reservoir of buried hill[J]. *Xinjiang Geology*, 2003(2): 210-213.
- [41] 庞雯, 史鸿祥. 轮南地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶特征[J]. *新疆石油地质*, 2008(1): 37-40.
PANG Wen, SHI Hongxiang. The Paleo-Karst Feature of Ordovician Carbonate Rocks in Lunan Area[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008(1): 37-40.
- [42] 刘善华, 代宗仰, 吴长江. 油气储层岩溶研究[J]. *中国石油勘探*, 2005(6): 24-28.
LIU Shanhua, DAI Zongyang, WU Changjiang. Karstification Study on Gas-oil Reservoirs[J]. *China Petroleum Exploration*, 2005(6): 24-28.
- [43] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. *中国岩溶*, 2004(3): 47-52.
HAN Xingrui. Karst water bursting in tunnel and expert judging system[J]. *Carsologica Sinica*, 2004(3): 47-52.
- [44] 陈胜, 张哨楠, 邓礼正, 孟祥豪, 叶欣. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系古岩溶研究[J]. *物探化探计算技术*, 2007(3): 239-243.
CHEN Sheng, ZHANG Shaonan, DENG Lizheng, MEN Xianghao, YE Xin. The research on Ordovician palaeokarst in Tabamiao area of Ordos basin[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007(3): 239-243.
- [45] 牛玉静, 康志宏, 龙旭, 崔文彬. 塔河油田奥陶系岩溶油藏溶洞储集体成因及演化[J]. *现代地质*, 2011, 25(4): 650-659.
NIU Yujing, KANG Zhihong, LONG Xu, CUI Wenbin. Origin and evolution of ordovician karst cave reservoir in Tahe Oilfield[J]. *Geoscience*, 2011, 25(4): 650-659.
- [46] 曲全工, 张敬轩, 陆友明, 朱凤云. 厚层灰岩油藏岩溶纵向分带研究: 以塔河油田四区油藏为例[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 17-21.
QU Quangong, ZHANG Jingxuan, LU Youming, ZHU Fengyun. Vertical zoning of karst formations in reservoirs with thick limestones: A case study of district 4 in Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(1): 17-21.
- [47] 熊道锬, 傅荣华. 岩溶发育强度垂直分带方法[J]. *岩土工程技术*, 2005(3): 113-117.
XIONG Daokun, FU Ronghua. Vertical Zonation Method for Intensity of Karst Development[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005(3): 113-117.
- [48] 王晔磊, 邱隆伟, 师政, 曹中宏, 张红尘. 基于FMI测井相的岩溶发育模式: 以渤海湾盆地黄骅坳陷南堡凹陷古生界为例[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(3): 301-306.
WANG Yelei, QIU Longwei, SHI Zheng, CAO Zhonghong, ZHANG Hongchen. Study on Karst Development Pattern Based on FMI Logging Facies: A Case Study of Paleozoic Strata in Nanpu Sag of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(3): 301-306.
- [49] 冯庆付, 江青春, 任梦怡, 汪泽成, 刘英明, 田瀚, 黄士鹏. 碳酸盐岩岩溶储层多井评价方法及地质应用[J]. *天然气工业*, 2019, 39(9): 39-47.
FENG Qingfu, JIANG Qingchun, REN Mengyi, WANG Zecheng, LIU Yingming, TIAN Han, HUANG Shipeng. A multi-well evaluation method for carbonate karst reservoirs and its geological application[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(9): 39-47.
- [50] 蒋裕强, 陶艳忠, 谷一凡, 王珏博, 强子同, 江娜, 林刚, 蒋婵. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组热液白云石化作用[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 51-60.
JIANG Yuqiang, TAO Yanzhong, GU Yifan, WANG Juebo, QIANG Zitong, JIANG Na, LIN Gang, JIANG Chan. Hydrothermal dolomitization in Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(1): 51-60.
- [51] 王一刚, 窦立荣, 文应初, 张静, 刘划一. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏H₂S成因研究[J]. *地球化学*, 2002(6): 517-524.
WANG Yigang, DOU Lirong, WEN Yingchu, ZHANG Jing, LIU Huayi. Origin of H₂S in Triassic Feixianguan Formation gas pools, Northeastern Sichuan Basin, China[J]. *Geochimica*, 2002(6): 517-524.
- [52] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 马永生, 戴金星, 周国源. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造: 四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. *岩石学报*, 2006(8): 2182-2194.
ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, LIANG Yingbo, MA Yongsheng, DAI Jinxing, ZHOU Guoyuan. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006(8): 2182-2194.
- [53] 牛君, 黄文辉, 梁飞, 王文勇, 万欢, 游声刚, 张亚美. 玉北地区奥陶系碳酸盐岩埋藏型岩溶发育特征及有利储层分布[J]. *东北石油大学学报*, 2017, 41(6): 74-84.
NIU Jun, HUANG Wenhui, LIANG Fei, WANG Weiyong, WAN Huan, YOU Shenggang, ZHANG Yamei. Buried Palaeokarst characteristics and favorable reservoir distribution of Ordovician carbonate rock in Yubei area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41(6): 74-84.
- [54] 金振奎, 余宽宏. 白云岩储集层埋藏溶蚀作用特征及意义: 以塔里木盆地东部下古生界为例[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 428-434.
Jin Zhenkui, Yu Kuanhong. Characteristics and significance of the burial dissolution of dolomite reservoirs: Taking the Lower Palaeozoic in eastern Tarim Basin as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 428-434.
- [55] 李辉, 李国蓉, 罗韵, 符浩, 高鱼伟, 朱永源, 张文. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩储层深部热液特征分析[J]. *东北石油大学学报*, 2014, 38(6): 12-21.
LI Hui, LI Guorong, LUO Yun, FU Hao, GAO Yuwei, ZHU Yongyuan, ZHANG Wen. Analysis of characteristics of deep hydrothermal fluids in Ordovician carbonate reservoir in Tahe area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2014, 38(6): 12-21.

- [56] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 王毅, 闫相宾. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. *地质学报*, 2006(2): 245-253.
JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, ZHANG Xuefeng, WANG Yi, YAN Xiangbin. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006(2): 245-253.
- [57] 陈兰朴, 李国蓉, 吴章志, 朱亚林, 符浩, 高鱼伟, 王雨辰, 王冬娅, 何赛, 胡静. 塔里木盆地塔河油田东南斜坡海西晚期奥陶系热液作用[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(3): 410-419.
CHEN Lanpu, LI Guorong, WU Zhangzhi, ZHU Yalin, FU Hao, GAO Yuwei, WANG Yuchen, WANG Dongya, HE Saiwei, HU Jing. Study on the Ordovician hydrothermal action at Late Hercynian in the southeast slope of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(3): 410-419.
- [58] 黄思静, Hairuo Qing, 裴昌蓉, 胡作维, 吴素娟, 孙治雷. 川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量、锶同位素组成与白云石化流体[J]. *岩石学报*, 2006(8): 2123-2132.
HUANG Sijing, Hairuo Qing, PEI Changrong, HU Zuowei, WU Sujuan, SUN Zhilei. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006(8): 2123-2132.
- [59] 胡明毅, 蔡习尧, 胡忠贵, 钱勇, 向娟. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩深部埋藏溶蚀作用研究[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(6): 49-54.
HU Mingyi, CAI Xiyao, HU Zhonggui, QIAN Yong, XIANG Juan. Deep Buried Dissolution of Ordovician Carbonates in Tazhong Area of Tarim Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(6): 49-54.
- [60] 钱一雄, Conxita Taberner, 邹森林, 尤东华, 王蓉英. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较: 以塔北和塔中地区为例[J]. *海相油气地质*, 2007(2): 1-7.
QIAN Yixiong, Conxita Taberner, ZOU Senlin, YOU Donghua, WANG Rongying. Diagenesis Comparison between Epigenic Karstification and Burial Dissolution in Carbonate Reservoirs: An Instance of Ordovician Carbonate Reservoirs in Tabei and Tazhong Regions, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007(2): 1-7.
- [61] 丁茜, 何治亮, 王静彬, 朱东亚. 生烃伴生酸性流体对碳酸盐岩储层改造效应的模拟实验[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 223-234.
DING Qian, HE Zhiliang, WANG Jingbin, ZHU Dongya. Simulation experiment of carbonate reservoir modification by source rock-derived acidic fluids[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 223-234.
- [62] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 张学丰. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. *地质论评*, 2008(3): 348-354.
ZHU Dongya, JIN Zhijun, HU Wenxuan, ZHANG Xuefeng. Effects of Deep Fluid on Carbonates Reservoir in Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 2008(3): 348-354.
- [63] 雷川, 陈红汉, 苏奥, 王丽娜. 碳酸盐岩埋藏溶蚀研究进展[J]. *断块油气田*, 2014, 21(2): 165-170.
LEI Chuan, CHEN Honghan, SU Ao, WANG Lina. Study progress on buried dissolution in carbonate rock[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, 21(2): 165-170.
- [64] 李培军, 陈红汉, 唐大卿, 曹自成, 鲁子野, 苏奥, 魏华动. 塔里木盆地顺南地区中-下奥陶统NE向走滑断裂及其与深成岩溶作用的耦合关系[J]. *地球科学*, 2017, 42(1): 93-104.
LI Peijun, CHEN Honghan, TANG Daqing, CAO Zhicheng, LU Ziyue, SU Ao, WEI Huadong. Coupling Relationship between NE Strike Slip Faults and Hypogenic Karstification in Middle-Lower Ordovician of Shunnan Area, Tarim Basin, Northwest China[J]. *Earth Science*, 2017, 42(1): 93-104.
- [65] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 李新华, 李涛, 吕艳萍, 何新明, 杨德彬. 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, 36(3): 347-355.
LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, LI Xinhua, LI Yao, LV Yanping, HE Xinming, YANG Debin. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 347-355.
- [66] 程洪, 汪彦, 鲁新便. 塔河地区深层碳酸盐岩断溶体圈闭类型及特征[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 301-309.
CHENG Hong, WANG Yan, LU Xinbian. Classifications and characteristics of deep carbonate fault-karst trap in Tahe area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 301-309.
- [67] 丁志文, 汪如军, 陈方方, 阳建平, 朱忠谦, 杨志敏, 孙晓辉, 鲜波, 李二鹏, 史涛, 左超, 李阳. 断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律: 以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 286-296.
DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, YANG Jinxin, ZHU Zhongqian, YANG Zhimin, SHUN Xiaohui, XIAN Bo, LI Erpeng, SHI Bo, ZUO Chao, LI Yang. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang oilfield, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 286-296.
- [68] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 102-111.
Qi Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 102-111.
- [69] 唐海, 何娟, 荣元帅, 李小波. 塔河断溶体油藏典型断溶体注水驱替规律及剩余油分布特征[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(3): 95-100.
TANG Hai, HE Juan, RONG Yuanshuai, LI Xiaobo. Study on water drive law and characteristics of remaining oil distribution of typical fault-karst in fault-karst reservoirs, Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(3): 95-100.
- [70] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 刘永立, 李映涛. 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.

- LV Haitao, HAN Jun, ZHANG Jibiao, LIU Yongli, LI Yingbo. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(1): 14-22.
- [71] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 鲍典, 曹飞, 杨德彬. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征: 以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(4): 461-469.
- LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, BAO Dian, CAO Fei, YANG Debin. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(4): 461-469.
- [72] 吕艳萍, 罗君兰, 王炯, 张娟, 张振哲, 马海陇, 李兴. 塔河油田典型碳酸盐岩断溶体发育模式[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 36(1): 20-27.
- LV Yanping, LUO Junlan, WANG Jiong, ZHANG Juan, ZHANG Zhenzhe, MA Hailong, LI Xing. Development mode of typical carbonate fault-affected karst system in Tahe Oilfield[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2021, 36(1): 20-27.
- [73] 马乃拜, 金圣林, 杨瑞召, 孟令彬, 王力, 胡永葵. 塔里木盆地顺北地区断溶体地震反射特征与识别[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(2): 398-403.
- MA Naibai, JIN Shenglin, YANG Ruizhao, MEN Lingbin, WANG Li, HU Yongqin. Seismic response characteristics and identification of fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(2): 398-403.
- [74] 李鹏飞, 崔德育, 田浩男. 塔里木盆地塔北地区X区块断溶体刻画方法与效果[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(S1): 189-194.
- LI Pengfei, CUI Deyu, TIAN Haonan. Fault-karst carbonate reservoir description with GeoEast interpretation sub-system in the Tabei Area, Tarim Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(S1): 189-194.
- [75] 李海英, 刘军, 龚伟, 黄超, 任丽丹. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(03): 107-120.
- LI Haiying, LIU Jun, Gong WEI, HUANG Chao, REN Lidan. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(03): 107-120.
- [76] 文山师, 李海英, 洪才均, 马灵伟, 陈俊安, 周振. 顺北油田断溶体储层地震响应特征及描述技术[J]. *断块油气田*, 2020, 27(1): 45-49.
- WEN Shanshi, LI Haiying, HONG Caijun, MA Lingwei, CHEN Junan, ZHOU Zhen. Technology of seismic response characteristics and description of fault-karst reservoir in Shunbei Oilfield[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(1): 45-49.
- [77] 张文彪, 段太忠, 李蒙, 赵华伟, 商晓飞, 汪彦. 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, ZHAO Huawei, SHANG Xiaofei, WANG Yan. 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): 314-325.
- [78] 郭长武, 蒋春雷, 郑志祥, 刘伟. 塔中16-24井区奥陶系碳酸盐岩古岩溶研究[J]. *矿物岩石*, 2002(2): 69-73.
- WU Changwu, JIANG Chunlei, ZHENG Zhixiang, LIU Wei. The research on the ancient karst of the well TZ16-TZ24 area in the central Tarim Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2002(2): 69-73.
- [79] 王国亭, 程立华, 孟德伟, 朱玉杰, 孙建伟, 黄锦袖, 彭艳霞. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征、形成机理与天然气富集潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 685-695.
- WANG Guoting, CHENG Lihua, MENG Dewei, ZHU Yujie, SUN Jianwei, HUANG Jinxiu, PENG Yanxia. Characterization and formation of the Ordovician tight paleokarst carbonates in the eastern Ordos Basin and its gas accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 685-695.
- [80] 兰朝利, 廖保方, 王志坤, 等. 南堡滩海潜山古岩溶发育特征及模式[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(2): 35-41.
- Lan Chaoli, Liao Baofang, Wang Zhikun, et al. Development characteristics and models of paleo-karst of buried hill in Nanpu offshore[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(2): 35-41.
- [81] 王文勇. 塔里木盆地玉北地区奥陶系储层古岩溶发育特征与主控因素分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Wang Wenyong. Palaeokarst characteristics and Main Controlling Factors of Ordovician Carbonate in YuBei area of Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2014.
- [82] 齐义彬, 丁茜, 朱东亚, 何治亮. 不同种类微生物对碳酸盐岩溶蚀普遍性[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 986-990.
- QI Yibin, DING Qian, ZHU Dongya, HE Zhiling. The Universality of Carbonate Rocks Dissolution by Different Microorganisms[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(3): 986-990.
- [83] 刘忠宝, 于炳松, 李廷艳, 樊太亮, 蒋宏忱. 塔里木盆地塔中地区中上奥陶统碳酸盐岩层序发育对同生期岩溶作用的控制[J]. *沉积学报*, 2004(1): 103-109.
- LIU Zhongbao, YU Bingsong, LI Tingyan, FAN Tailiang, JIANG Hongchen. Sequence development controls on iynogenesis karst of the Middle-upper Ordovician Carbonate in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004(1): 103-109.
- [84] 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 文龙, 王文之, 陈康. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. *石油学报*, 2015, 36(4): 416-426.
- LUO Bing, YANG Yueming, LUO Wenjun, WENG Long, WANG Wenzhi, CHEN Kang. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015,

- 36(4): 416-426.
- [85] 王振宇, 李凌, 谭秀成, 代宗仰, 马青. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型识别[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008(5): 11-16.
- WANG Zhenyu, LI Ling, TAN Xiucheng, DAI Zongyang, MA Qing. Types and recognizable indicators of Ordovician carbonate rock karstification in Tarim Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008(5): 11-16.
- [86] 曹红霞, 吴海燕, 任星民, 武渝, 梁全胜, 仝敏波. 鄂尔多斯盆地东南部奥陶系岩溶古地貌与储层分布规律[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 146-155.
- CAO Hongxia, WU Haiyan, REN Xingmin, WU Yu, LIANG Quansheng, TONG Minbo. Karst paleogeomorphology and reservoir distribution pattern of Ordovician in the southeastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 146-155.
- [87] 谭茂金, 赵文杰. 用核磁共振测井资料评价碳酸盐岩等复杂岩性储集层[J]. 地球物理学进展, 2006(2): 489-493.
- TAN Maojin, ZHAO Wenjie. Description of carbonate reservoirs with NMR log analysis method[J]. Progress in Geophysics, 2006(2): 489-493.
- [88] 曹鉴华, 张学丰. YQ地区奥陶系碳酸盐岩岩溶储层地震属性预测[J]. 特种油气藏, 2012, 19(02): 42-45.
- CAO Jianhua, ZHANG Xuefeng. Seismic attributes prediction of Ordovician carbonate karst reservoirs in YQ area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(02): 42-45.
- [89] 郭长武, 龚福华, 魏建新, 梁全胜, 孙全元. 地震物理正演模拟在古岩溶储层研究中的应用[J]. 江汉石油学院学报, 2004(4): 74-76.
- WU Changwu, GONG Fuhua, WEI Jianxin, LIANG Quansheng, SUN Quanyuan. Application of seismic physical forward modeling in palaeokarst reservoir study[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2004(4): 74-76.
- [90] Alessandro D Grasso, Pierre-Yves Jeannin, Francois Zwahlen. A deterministic approach to the coupled analysis of karst springs' hydrographs and chemographs[J]. Journal of Hydrology, 2003, 271(1-4): 65-76.
- [91] 朱光有, 张水昌, 梁英波. 中国海相碳酸盐岩气藏硫化氢形成的控制因素和分布预测[J]. 科学通报, 2007(S1): 115-125.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Controlling factors and distribution prediction of hydrogen sulfide formation in Marine carbonate gas reservoirs in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007(S1): 115-125.
- [92] 阮壮, 于炳松, 李朝晖, 朱筱敏. 埋藏条件下方解石热力学平衡及其在塔河油田埋藏岩溶预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(04): 1020-1027.
- RUAN Zhuang, YU Bingsong, LI Zhaohui, ZHU Xiaomin. Thermodynamic equilibrium of calcite in strata environment and its application of burial karst forecasting in Tahe oil field, Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(04): 1020-1027.
- [93] 刘群, 李海英, 邓光校. 地震断裂检测技术在塔河油田南部碳酸盐岩储层及油藏预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(02): 202-206.
- Liu Qun, Li Haiying, Deng Guangxiao. Application of seismic fault detection to carbonate reservoir prediction in southern Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(02): 202-206.
- [94] 徐红霞, 沈春光, 李斌, 董文学. 多属性分析技术在碳酸盐岩断溶体预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(S2): 158-163.
- XU Hongxia, SHEN Chunguang, LI Bin, DONG Wenxue. Fault-karst carbonate reservoir prediction with comprehensive multi-attribute analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S2): 158-163.
- [95] 闫亮, 季苗, 贾宝迁, 陈晓彤, 高平. 塔里木盆地顺北断溶体油气藏微生物特征及有利区预测[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 576-585.
- YAN Liang, JI Miao, JIA Baoqian, CHEN Xiaotong, GAO Ping. Microbial characteristics of Shunbei faulted-karst reservoirs and prediction of play fairways, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 576-585.
- [96] Bigoni F, Pirrone M, Pinelli F. A multi-scale path for the characterization of heterogeneous karst carbonates: How log-to-seismic machine learning can optimize hydrocarbon production[C]. SPWLA 60th Annual Symposium, 2019.

Research progress of paleokarst oil and gas reservoirs

ZHANG Yu¹, ZHAO Lun¹, LI Changhai², ZHANG Xiangzhong¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; ; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The transformation of soluble rocks by paleokarst can form dissolution pores and other reservoir spaces. Especially for carbonate rocks, the development of paleokarst can greatly improve the reservoir performance of the formation and form karst reservoirs with good porosity and permeability. Paleokarst related oil and gas reservoirs are developed in many large and super-large carbonate oil and gas fields at home and abroad, such as Yurubcheno Oilfield in Russia, Yates Oilfield in the United States, Halfaya Oilfield in Iraq, Renqiu Oilfield, Tahe Oilfield, Maokou formation and Dengying formation in Sichuan Basin and Ordovician formation in Ordos Basin in China. As one of the

important reservoir types in carbonate formation, the development and distribution of karst reservoirs are of great significance in the study on carbonate reservoirs.

This paper systematically summarizes the previous studies on different types of karst reservoirs and the latest research progress of paleokarst oil and gas reservoirs, which are of important reference value for understanding the development and distribution of karst reservoirs in oil-gas basins in China. The following problems and results can be concluded in the study of paleokarst oil and gas reservoirs.

There are few studies on early diagenetic karst reservoirs, and most of them focus on the formation mechanism and development characteristics of eogenetic karst reservoirs. In addition, there is no corresponding practice on how to use logging and seismic data to predict the distribution of this type of reservoir.

There are many studies on supergene karst reservoirs, mainly focusing on paleogeomorphology restoration and vertical zonation. Meanwhile, many palaeogeomorphology restoration methods have been proposed, such as impression method, residual thickness method, stripping and filling method, sedimentological analysis method, sequence stratigraphy method, layer leveling method, double-interface method, well-seismic combination method and the new seismic geomorphology method. However, all of the present restoration methods of paleokarst geomorphology have their advantages and disadvantages in certain applicable scope, and can only be used to restore paleokarst geomorphology qualitatively and semi-quantitatively. How to precisely quantify the restoration of paleokarst geomorphology remains further studied. In terms of vertical zonation, many schemes have been proposed from the perspectives of runoff strength, karst space form, karst development intensity, and the characteristics of hydrodynamic action. In particular, a great deal of research and practice has been carried out on the characteristics of hydrodynamic action, and a variety of vertical zonation schemes have been put forward to divide karst vertically into 2-6 zones. But in general, although there are many schemes to divide the vertical zonation of paleokarst, a unified classification has not yet been formed. Besides, the boundary between the vertical zonation and the zonation is not clear, so it is unlikely to distinguish them quantitatively and accurately. From the case study of Sichuan Basin and Tarim Basin in China, buried karst reservoirs have significant identification marks in mineralogy, petrology and geochemistry. In the prediction of buried karst reservoir, the current research is mainly focused on migration channel and fluid distribution. From the perspective of reservoir formation, the research on buried karst reservoirs at present is mainly focused on sulfate thermal reduction and hydrothermal dissolution, but there is a lack of relevant research on buried karst reservoirs affected by organic acids.

As a hotspot of karst reservoir research in recent years, the studies on fault-karst reservoirs are mainly focused on the development mechanism and characterization of fault solutions, etc. The recognition, characterization and prediction of fault-karst reservoirs mainly rely on seismic data, and are significantly affected by the resolution of seismic data.

There are many internal and external factors affecting the development of paleokarst oil and gas reservoirs. The internal factors include lithology, development degree of primary pores, rock structure, mud and acid insoluble content, fractures, etc. The external factors mainly include sedimentary facies, rise and fall of sea levels, palaeogeomorphology, tectonic movement and paleoclimate.

In terms of the prediction of paleokarst oil and gas reservoirs, the accurate prediction of karst reservoirs cannot be achieved with single geological or seismic data, because there are many factors affecting the development of karst reservoirs and many differences in the formation mechanism and development characteristics of different types of karst reservoirs. The comprehensive prediction method based on geology-log-seismic can be adopted as the mainstream of karst reservoir prediction in the future. With the continuous development of geophysics and artificial intelligence of oil and gas, the increasing new methods and technologies will be applied to karst reservoir prediction.

Key words paleokarst, karst reservoir, fault-karst, reservoir prediction

(编辑 张玲)