塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系

倪新锋[1,2] 张丽娟[1] 沈安江[2] 潘文庆[1] 乔占峰[2]

(1.中国石油塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000; 2.中国石油杭州地质研究院,浙江 杭州 310023)

提要:古岩溶作用是塔里木盆地北部地区奥陶系海相碳酸盐岩储层形成的关键要素之一。本文以岩石学、地球物理资料及测试分析资料为基础,将塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶划分为准同生岩溶、埋藏岩溶、风化壳岩溶三大类及若干亚类。准同生岩溶作用控制早期碳酸盐岩储层的形成与分布,埋藏岩溶作用一般沿原有的孔缝系统进行,是碳酸盐岩储层优化改造的关键因素之一,风化壳岩溶作用是奥陶系碳酸盐岩储层形成的关键作用。塔里木叠合盆地的多旋回构造演化特点,形成了塔北奥陶纪不同阶段、不同类型碳酸盐岩 6 期古岩溶作用的叠加、改造关系,其中对于塔北地区奥陶系古岩溶储层起重要作用的为早加里东期Ⅱ幕,加里东中期Ⅰ幕、Ⅱ幕和海西早期。塔北地区奥陶系各类岩溶具有复杂而显著的叠合关系,准同生期岩溶为后期的埋藏岩溶提供了成岩介质通道,随后发育的埋藏及风化壳岩溶则是继承并叠加早期准同生岩溶通道的发育,最终成为潜在的优质储层。

关 键 词:准同生岩溶;埋藏岩溶;风化壳岩溶;岩溶期次;叠合关系;塔北地区;奥陶系

中图分类号:P642.251 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-3657(2009)06-1312-10

碳酸盐岩储层作为一类主要的油气储层类型,其形成、演化与碳酸盐岩古岩溶密切相关。塔里木盆地北部(以下简称塔北)地区轮南、英买力及哈拉哈塘等地区的奥陶系海相碳酸盐岩古岩溶储层较为发育,并成为目前塔里木盆地乃至国内海相碳酸盐岩勘探开发的热点和亮点。其发育层位众多、分布面积广,厚度大,岩溶作用类型复杂、期次多,储层非均质性强。众多学者[1-15]应用沉积学、岩石学、水文地质学、地球物理学、地球化学以及各类测试分析等理论和方法对碳酸盐岩古岩溶作用及发育规律进行了多方面的研究。但目前为止对于古岩溶的类型、发育的期次还存在一定的分歧❶[8-10],古岩溶的发育规律、控制因素以及各种古岩溶类型对储层发育的控制作用还有待于深入和系统化。因此,本文以岩石学、地球物理资料及测试分析资料为基础,对塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用发育特征、成因类型和发育期次进行研究,剖析古岩溶发育规律,对于塔北地区奥陶系碳酸盐岩油气勘探及有利区带的认识具有一定的理论和实践指导意义。

1 古岩溶发育的物质基础

奥陶纪塔里木盆地主要发育了克拉通内坳陷和克拉通边缘坳陷相复合的盆地类型,克拉通内坳陷以台地相沉积为主,克拉通边缘坳陷以盆地相沉积为主[16]。沉积古地理格局表现为盆地-斜坡-台地体系组成的温暖海洋,总的特征是东深西浅,东部为继承性的广海陆棚到盆地沉积环境,中部与西部发育浅海镶边碳酸盐岩台地,两者之间为一狭窄的斜坡过渡带[10,17]。在中部与西部广阔的碳酸盐岩台地上,堆积了 1000 多米厚的海相碳酸盐岩。下奥陶统主要发育局限台地相白云岩、云质灰岩、灰质云岩及砂屑灰岩、粉晶灰岩等;中奥陶统堆积半局限-局限海台

收稿日期:2009-03-04 **改回日期**:2009-06-16

基金项目:国家科技重大专项"大型油气田及煤层气开发"(2008ZX05004-002)及塔里木油田公司 2008 年度博士后项目资助。

作者简介:倪新锋,男,1978 年生,博士,工程师,主要从事沉积学与含油气盆地分析研究;E-mail:nixf_hz@petroChina.com.cn。

❶ 张丽娟.奥陶系岩溶分类、期次及研究思路.塔里木油田公司桂林岩溶研讨会讲稿,2008.

地相不等厚互层的石灰岩与白云岩；上奥陶统演变为开阔海台地相泥晶灰岩、颗粒灰岩等沉积,台地边缘相的镶边体系则主要由颗粒滩和粘结-障积生物礁组成礁、滩复合体[16]。奥陶系碳酸盐岩的广泛发育及其岩石组合类型为古岩溶作用的发生提供了有利的物质基础。然而,由于碳酸盐沉积物对成岩作用十分敏感，所以它们在沉积后很容易在胶结和压实等破坏性成岩作用的影响下演变成致密岩层，丧失其储集能力。因此,碳酸盐岩储层的形成往往与成岩过程中诸如岩溶、破裂等建设性成岩作用密切相关[10]。

2　古岩溶成因类型及特征

古岩溶的成因类型是碳酸盐岩古岩溶研究的基础。目前古岩溶的分类极不统一，因分类依据的不同,可有多种分类方案❶[9,13,18-24]。纵观前人的分类,结合研究区奥陶系的实际情况,遵循科学性、勘探实用性、成因联系性的原则将研究区碳酸盐岩古岩溶划分为三大类：准同生岩溶、埋藏岩溶和风化壳岩溶(表 1)。

2.1　准同生岩溶

准同生岩溶作用发生于沉积同生期或准同生期的大气淡水环境中。在海退和向上变浅的沉积序列中,碳酸盐潮坪、颗粒滩、生物礁等浅水沉积区,伴随着海平面的相对下降,时而出露海面或处于淡水透镜体内,在潮湿多雨的气候条件下,受到富含 CO_2 的大气淡水淋滤,既可以选择性地溶蚀由文石、高镁方解石等不稳定矿物组成的颗粒或第一期方解石胶结物,形成粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔,又可发生非选择性溶蚀作用,形成溶缝和溶洞。准同生岩溶同时又受沉积环境控制,因此可根据沉积环境的差异将其细分为台缘礁、滩型,台内点礁、滩型,潮坪型。

准同生岩溶作用在岩心上主要表现为泥晶生屑灰岩、亮晶鲕粒灰岩、泥晶灰岩等形成的溶蚀孔洞缝(图 1-a)。在微观上,准同生岩溶主要的识别标志包括:(1)在高能粒屑滩相中的颗粒灰岩中,原生粒间孔内只有第一期的纤状环边方解石胶结物被溶蚀,变得残缺不全,而其后期的粒状方解石或粗晶方解石却保存完整（图 1-b)，这说明该岩石只发生了准同生溶蚀。(2)选择性溶蚀形成的粒内溶孔、铸模孔、粒间孔和泥晶套等(图 1-c、d);(3)粒间溶孔被渗流粉砂充填是大气淡水渗流带的典型标志之一(图 1-e、f);(4)发育悬垂型或新月型等特征的方解石胶结物,常见于

表 1　塔北地区古岩溶成因类型及特征

Table 1　Types and characteristics of paleokarst in northern Tarim Basin

本文分类		相当的（或包括的）岩溶类型	主要地质作用	成岩阶段（环境）
一级分类	二级分类			
准同生岩溶	台缘礁、滩型 台内点礁、滩型 潮坪型	沉积岩溶、早表生（期）岩溶、同生期层间岩溶	1、大气淡水的溶解作用 2、地表物理和化学风化作用	同生成岩阶段（大气淡水环境）
埋藏岩溶	有机酸岩溶 压释水岩溶 热液岩溶 无机酸水岩溶（TSR）	深埋岩溶、深部岩溶、热液岩溶、埋藏溶蚀、压释水岩溶、缝洞系岩溶、埋藏（期）有机酸岩溶	1、基本脱离大气淡水的风化作用 2、完全脱离海水的沉积作用 3、进入地下水基准面以下，埋藏成岩作用； 4、受到来自深部及侧向的活性水的作用。	早成岩至晚成岩阶段（埋藏环境）
风化壳岩溶	短期暴露不整合岩溶 长期隆升风化壳岩溶	层间岩溶、表生（期）岩溶、暴露岩溶、侵蚀面岩溶、不整合面岩溶、裸露期风化壳岩溶、潜山岩溶	1、大气淡水溶解作用 2、地表物理和化学风化作用 3、地表水流的冲刷作用； 4、地表水流的沉积和充填作用。	表生成岩阶段（表生环境）

❶张丽娟.奥陶系岩溶分类、期次及研究思路.塔里木油田公司桂林岩溶研讨会讲稿,2008.

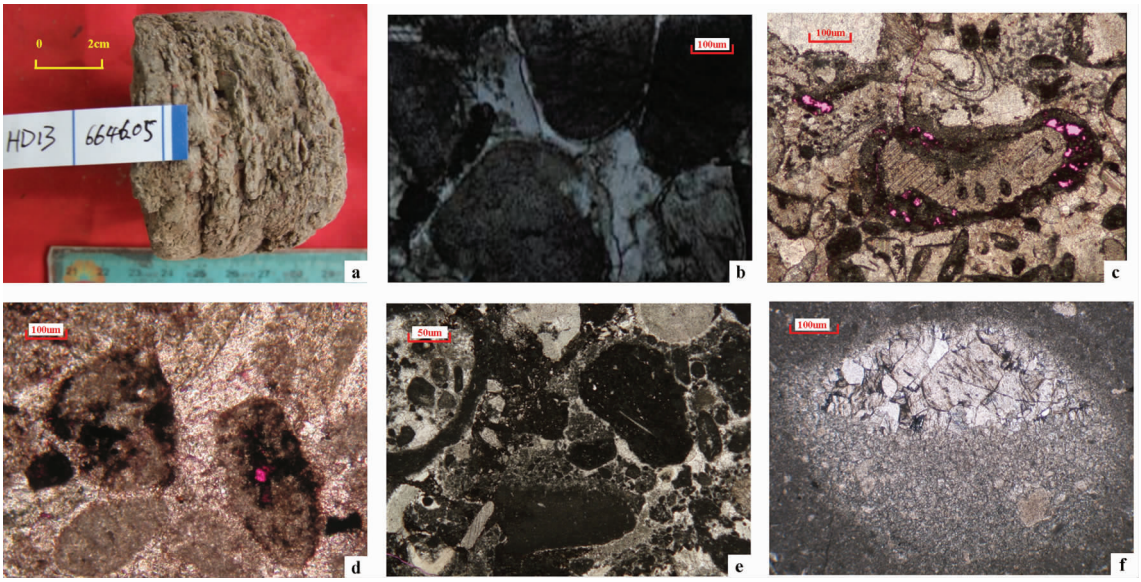


图 1 准同生岩溶识别标志

a—砂屑生屑灰岩,顺层溶蚀孔洞发育,半充填渗流粉砂,哈得 13 井,6646.05 m,一间房组;b—亮晶砂屑灰岩,颗粒普遍具泥晶套,同生期大气淡水溶蚀作用造成第一期纤状方解石胶结物残缺不全,粗亮晶方解石特别发育,轮南 54-1 井,5447 m,一间房组,单偏光;c—亮晶藻砂屑-生屑灰岩,颗粒藻包壳及泥晶套多见。藻包壳溶孔较多,个别藻砂屑见粒内溶孔,哈得 13 井,6646.06 m,一间房组,铸体,单偏光;d—砂粒屑灰岩,粒内溶孔,哈 9 井,6624.1 m,一间房组,铸体,单偏光;e—砂砾屑灰岩,砾屑成分多样,砾间见渗流粉砂,部分颗粒边缘少量亮晶胶结,哈得 13 井,6656.88 m,一间房组,铸体,单偏光;f—颗粒泥晶灰岩,同沉积期大气淡水溶蚀孔洞见示底构造:底部为渗流粉砂,在单偏光下颜色较暗;顶部为粒状方解石充填,在单偏光下颜色较浅,轮古 37 井,6242.92 m,良里塔格组,单偏光

Fig.1 Identification marks of penecontemporaneous karstification

a-Calcarenite-bioclastic limestone, with dissolved caverns along the layer, half filled with seepage silt, Hade13, 6646.05m, Yijianfang Formation; b-Sparite calcarenite, generally with micritic envelope, multilayered fibrous calcite cement resulting from syndepositional fresh-water dissolution at the first stage, coarse sparite calcite cement well developed, Lunnan 54-1, 5447m, Yijianfang Formation, plainlight; c-Sparite algae calcarenite-bioclastic limestone, well developed grained algae enclosures and micritic envelopes, with some intra-granular dissolved pores, Hade 13, 6646.06m, Yijianfang Formation, casting thin section, plainlight; d-Calcarenite, with intra-granular dissolved pores, Ha 9, 6624.1m, Yijianfang Formation, casting thin section, plainlight; e-Calcarenite-calcirudite, inter-calcirudite filled with seepage silt, with sparite calcite cement along some grain margins, Hade 13, 6656.88m, Yijianfang Formation, casting thin section, plainlight; f- Grained micritic limestone, dissolved caverns resulting form syndepositional fresh-water dissolution, with geopetal structure: seepage silt at the bottom, rather dark under plainlight, grained calcite filled at the top, fairly bright under plainlight, Lungu 37, 6242.92m, Lianglitage Formation, plainlight

粒屑滩顶部,但在塔北地区镜下所见较少。

2.2 埋藏岩溶

埋藏岩溶作用系指碳酸盐岩在中-深埋藏阶段主要与埋藏成岩作用相联系的溶蚀作用现象及过程。其形成主要为暴露的碳酸盐岩区再次接受沉积后,经准同生期和表生成岩作用的沉积物被埋藏转入相对封闭体系,在深埋和压实过程中随地温升高,地层水、生物腐解水和有机质热演化的酸性流体等,促使碳酸盐岩发生溶解、溶蚀,改变岩石的微观结构。这种岩溶作用常与油气的形成同步或稍晚于油气生成期,其形成的孔洞常被油气充注而成为有效的油气储集层[13]。又可根据流体的性质将其细分为有机酸岩溶、压释水岩溶、热液岩溶、无机酸水岩溶(TSR)。

埋藏型岩溶的溶蚀属于非选择性溶蚀,岩溶类型多样,既溶蚀岩石的颗粒又溶蚀各个时期的方解石、白云石以及早期白云石、重结晶白云石,形成晶间溶孔、晶间溶缝的次生孔缝[23];同时,早期为方解石所交代的生物也在后期埋藏中再次溶蚀形成生物溶孔。

在微观上,埋藏岩溶的识别标志主要为:(1)埋藏溶蚀作用总是首先沿着前期古风化壳岩溶带各类残余孔洞、晶间孔缝和裂缝发育。它的最直接证据就是孔洞、裂缝中充填的含铁方解石、铁白云石及异形

白云石等埋藏期充填物被溶蚀成晶间、晶内孔洞(图 2-a);(2)沿早期缝合线进行扩溶,形成溶扩压溶缝及溶蚀微孔或张开的未被完全充填的裂缝(图 2-b、c);(3)紧密排列的中粗晶白云岩晶体间存在较大的晶间孔或晶间溶孔, 表明了在深埋环境下经过压实作用后又被深部流体溶蚀而形成(图 2-d);(4)岩溶缝洞中充填的方解石晶体中包裹体均一化温度都比较高,一般大于 90℃(图 2-e);(5)裂缝中见有燧石充填,表明发生了深部硅质热液作用(图 2-f)。

2.3 风化壳岩溶

风化壳岩溶的形成原因是由于构造运动的抬升, 使可溶性岩层出露地表接受表生大气淡水淋滤而形成的,常常与区域性不整合面相关。准同生岩溶作用和风化壳岩溶作用都与大气淡水的淋滤有关,不过它们在成因机理、层位分布、孔洞规模等方面有较大的差别[25]。又可根据隆升暴露时间的长短分为短期暴露不整合岩溶(层间岩溶)和长期隆升风化壳(或古潜山)岩溶。后者是指地层长期缺失,与上覆不同时代地层不整合特征清楚,风化面凹凸不平,溶蚀不均匀,岩溶垂向分带清楚,储层具大洞、大缝特征,并且沿不整合面大面积分布。短期暴露不整合岩溶与之最大的区别在于地层缺失少, 与上覆地层间呈平行或低角度不整合接触,溶蚀规模相对小,储层沿不整合面大面积分布。

风化壳岩溶在野外露头上表现为岩溶角砾岩、古土壤、铝土矿等风化壳残积物(图 3-a)。地质录井中的识别标志:(1)钻时突然减小,钻速明显加快、放空、蹩跳钻、井漏、井涌现象发生;(2)严重泥浆漏失,泥浆槽面常见油花、油膜,岩屑有荧光显示,常见油迹,岩屑砂样中常见自形、半自形方解石;(3)气测油

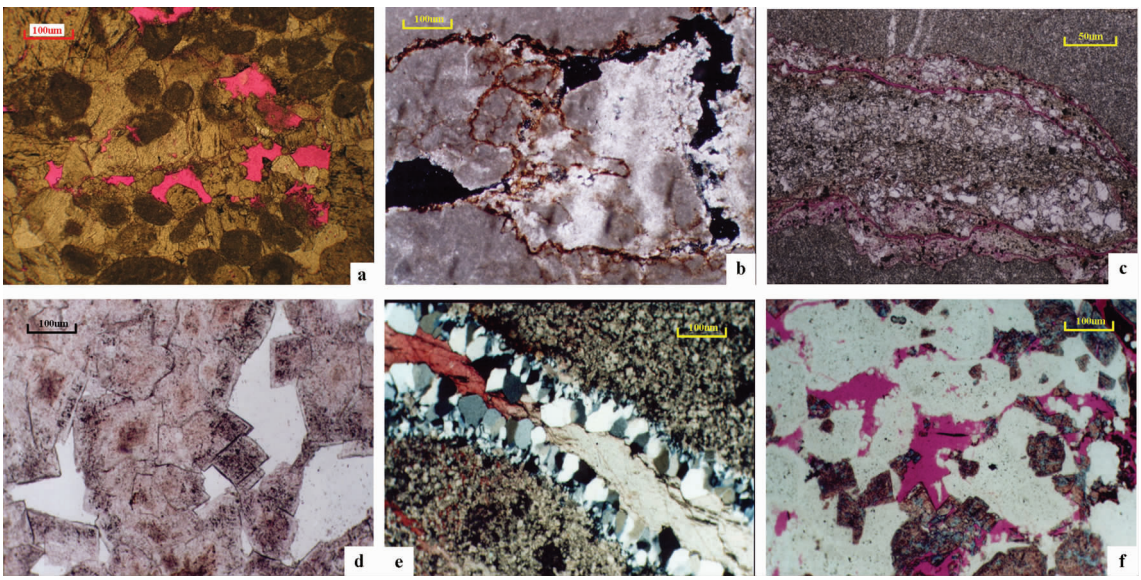


图 2　埋藏岩溶识别标志

a—亮晶生屑—藻砂屑灰岩,宽张缝交错充填方解石脉,埋藏岩溶形成溶蚀孔,轮古 35 井,6158.4 m,铸体,单偏光;b—沿压溶缝合线发育的扩大的次生溶孔,英买 202 井,6015.71 m,鹰山组,正交偏光;c—泥晶灰岩,缝合线有扩溶现象,由方解石、陆屑、泥质、黄铁矿充填,红色铸体,轮古 40 井,5658.18 m,一间房组,单偏光;d—中粗晶白云岩中发育的晶间孔,英买 4 井,5129.20 m,蓬莱坝组(?),单偏光;e—第二期裂缝及其中充填的亮晶方解石和硅质,包裹体均一温度 110~120 ℃ ,牙哈 303 井,5930.98 m,蓬莱坝组(?),正交偏光;f—中晶白云岩,自形晶白云石被硅质热液烘烤成褐色,硅质充填晶间孔或晶间溶孔,牙哈 3 井,5924.96 m,蓬莱坝组,单偏光

Fig.2　Identification marks of buried karstification

a- Sparite bioclastic limestone-algae calcarenite, dissolved pores in sparry calcite, Lungu 35, 6158.4m, Yijianfang Formation, casting thin section, plainlight; b-Expanded secondary dissolved pores developed along the pressolution seam, Yingmai 202 well, 6015.71m, Yingshan Formation, crossed polars; c-Micrite, with expanded dissolution along the seam, filled with calcite, terrigenous clastics, mud, and pyrite, red casting chip, Lungu 40, 5658.18m, Yijianfang Formation, plainlight; d- Inter-crystalline pores of medium-coarse crystal dolomite, Yingmai 4, 5129.20m, Penglaiba Formation (?), plainlight; e-Phase II fracture filled with sparry calcite and silica, homogenization temperature of the inclusion being 110~120 ℃, Yaha 303, 5930.98m, Penglaiba Formation (?), crossed polars; f-Medium crystal dolomite, idiomorphic crystal dolomite baked by silica hydrothermal fluid into brown color, Yaha 3, 5924.96m, Penglaiba Formation, plainlight

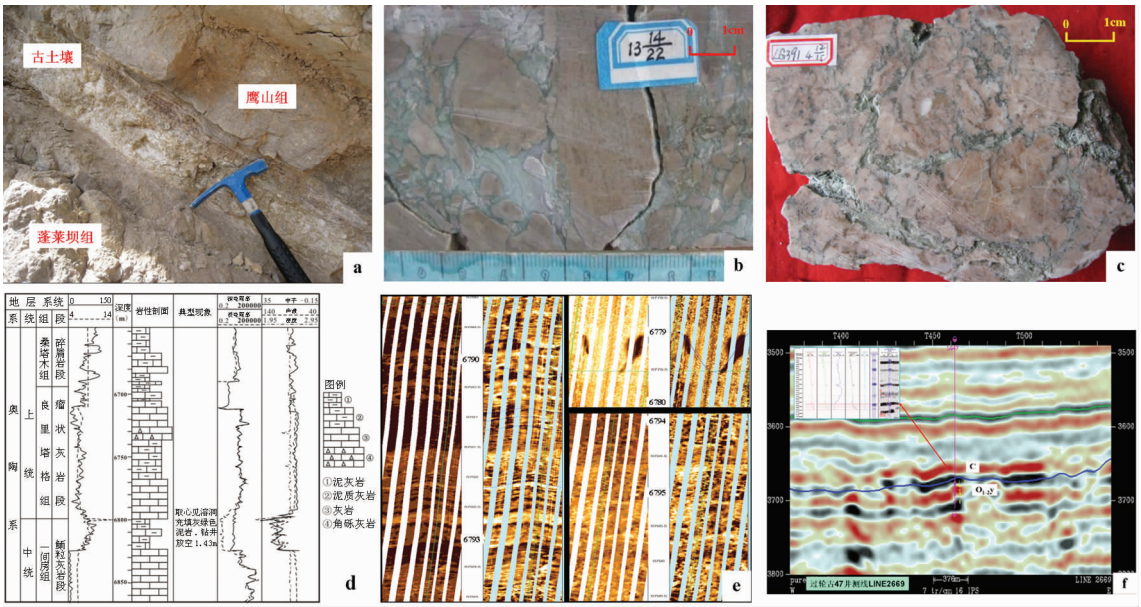


图 3 风化壳岩溶识别标志

a—新疆柯坪县北水泥厂奥陶系标准剖面,鹰山组与蓬莱坝组的平行不整合面上的古土壤;b—岩溶角砾岩,轮南 12 井,5313.3m,砾间充填灰绿色泥质,鹰山组;c—高角度缝被灰绿色泥质充填,轮古 391 井,5800m,良里塔格组;d—轮东 1 井奥陶系风化壳岩溶测井响应特征;e—短期暴露不整合岩溶成像测井特征,哈 6C 井,一间房组;f—过轮古 47 井($O_{1-2}y$)缝洞发育层段"强串珠"地震反射特征及合成记录

Fig.3 Identification marks of weathering karstification

Paleosol on the parallel unconformity between Yingshan Formation and Penglaiba Formation, Ordovician typical section at the cement plant, northern Keping County, Xinjiang; b–Karst breccia, Lunnan12, 5313.3m, inter–breccia filled with celadon mud, Yingshan Formation; c–High–angle fracture filled with celadon mud, Lungu 391, 5800m, Lianglitage Formation; d–Logging response characteristics of Ordovician weathering karstification in Lundong 1; e–Imaging logging characteristics of short–time exposed unconformable karst, Ha 6C, Yijianfang Formation; f–Seismic response characteristics of Ordovician weathering crust, seismic cross section Lungu47($O_{1-2}y$)

气显示明显,全烃,重烃,烃组分明显提高。岩心上表现为:(1) 岩溶岩性通常有角砾岩和碎屑岩 (图 3–b);(2) 中小型溶蚀孔洞多被泥质充填或半充填,孔洞通常呈瓶颈状、葫芦状或串珠状;(3)高角度溶蚀缝被红色、灰绿色泥质充填(图 3–c)。在测井上表现为"三高两低" (图 3–d),即声波时差、电磁波传播时间、中子孔隙度增高,双侧向电阻率和密度降低,井径扩大,中型、大型溶洞自然伽马增高。在成像测井上由于溶蚀孔洞及充填物电阻率低, 故静态电成像测井图像一般表现为黑色–棕色高导特征, 而围岩因电阻率高, 电成像测井图像颜色较浅, 多呈浅棕–亮黄色(图 3–e)。在地震反射上表现为弱振幅或暗点,强振幅或亮点,杂乱反射,平点等,频率降低,对地震波的吸收衰减增大, 溶蚀缝洞表现为 "强串珠"(图 3–f)。在微观薄片中常见未被亮晶方解石充填的溶孔、溶洞和溶缝,或见由于构造抬升形成的裂缝导致岩石角砾岩化, 以及形成几期构造裂缝及其中充填的常温包裹体的亮晶方解石。

3 古岩溶作用的期次及叠加、耦合关系

塔里木叠合盆地的多旋回构造演化特点, 形成了塔北奥陶纪不同阶段、不同类型碳酸盐岩 6 期古岩溶作用的叠加、改造关系,其中最主要的是加里东中期和海西早期[26,27],以及加里东早期 II 幕。多期同类型岩溶的叠加,或者是准同生岩溶、风化壳岩溶和埋藏岩溶三类岩溶的叠加或继承性发育, 都会使岩溶类型变的复杂,而难以辨识。从理论上来讲,古岩溶作用的期次包括两个方面: 上述三种古岩溶作用中同一类型的古岩溶作用在不同阶段的叠加、改造关系, 以及不同类型古岩溶在同一阶段和不同阶段的叠加、改造次序。鉴于古岩溶期次研究的目的主要在于界定多期成因、多期改造及多期充填的古岩溶作用的关系及发育演化规律, 并从一定程度上揭示各种成因类型、各期次岩溶作用对碳酸盐岩储层的

有效贡献量。限于目前的研究技术手段和勘探实际，对于古岩溶作用的期次和叠加关系只能落实到与构造运动密切相关的某一阶段内哪类岩溶作用占主导以及对储层的贡献效应。

3.1 加里东运动的分期与古岩溶

3.1.1 早加里东构造运动与古岩溶

寒武纪末的沉积暴露及短暂的喀斯特化在塔里木盆地具普遍性，康玉柱等[28]将塔北上寒武统与下奥陶统的平行不整合(地震 T_g^6 界面)接触关系作为加里东早期运动的标志。加里东早期运动在塔北地区形成了 2 期较为显著的平行不整合面：鹰山组($O_{1-2}y$)/蓬莱坝组(O_1p)，一间房组(O_2yj)/鹰山组($O_{1-2}y$)，2 期不整合分别对应于蓬莱坝组顶部 I 幕和鹰山组上部 II 幕 2 期古岩溶系统(图 4)。

早奥陶世—中奥陶世晚期 (两河口—大湾期)为台地生长阶段，由寒武纪局限台地向奥陶纪开阔台地过渡，岩性也由白云岩向灰岩过渡，厚度巨大。该碳酸盐台地是在塔里木板块南北有限洋盆扩张的构造背景下建造的， 台地四周被南北海槽和东部海盆围限，没有陆源物质输入，为典型的克拉通碳酸盐被动大陆边缘，在盆内形成广泛分布的沉没不整合。

实际上，寒武纪末发生在塔里木碳酸盐台地上的暴露剥蚀与此时全球海平面下降有关，处在拉张构造背景下的塔里木碳酸盐台地，在生长过程中发生的短暂暴露主要受控于全球海平面升降。塔北地区，这些短暂的暴露没有发生大规模的喀斯特化，主要形成鸟眼、窗格等小规模的溶蚀构造，对中、下奥陶统碳酸盐岩古岩溶储层的储渗空间的具有一定的贡献，一般具有短期暴露不整合岩溶(层间岩溶)的性质。

3.1.2 中加里东期构造运动的幕次与古岩溶

始于中奥陶世末的加里东中期运动在塔里木盆地的表现最为显著， 其结果是塔里木克拉通形成近东西向的隆坳格局及碳酸盐台地的消亡。

加里东中期岩溶主要表现为中奥陶世与晚奥陶世之间及中上奥陶统内部发生的岩溶作用。在中、晚奥陶世之交，正是塔里木盆地构造环境由拉张、离散向聚敛、挤压转换阶段，在此构造背景下，塔北广大地区发生了加里东中期运动，该期可细分为 2 幕(图 4)：

加里东中期第 I 幕发生于中、晚奥陶世间，与 $T_g^{5'}$ 不整合面相当。在晚奥陶世早期，塔里木盆地发生一次较大规模的海退[13,29,30]，塔北隆起距板块碰撞边界较远， 比塔中地区受影响弱， 地层抬升幅度不大，地形高差小，形成向北缓缓抬起的缓坡形态，仅造成中奥陶统顶部的相对短暂暴露， 表现为一间房组(O_2yj)与上覆吐木休克组(O_3t)间的假整合、间断，以及 2~3 个牙形刺带的缺失[29]。岩溶持续的时间

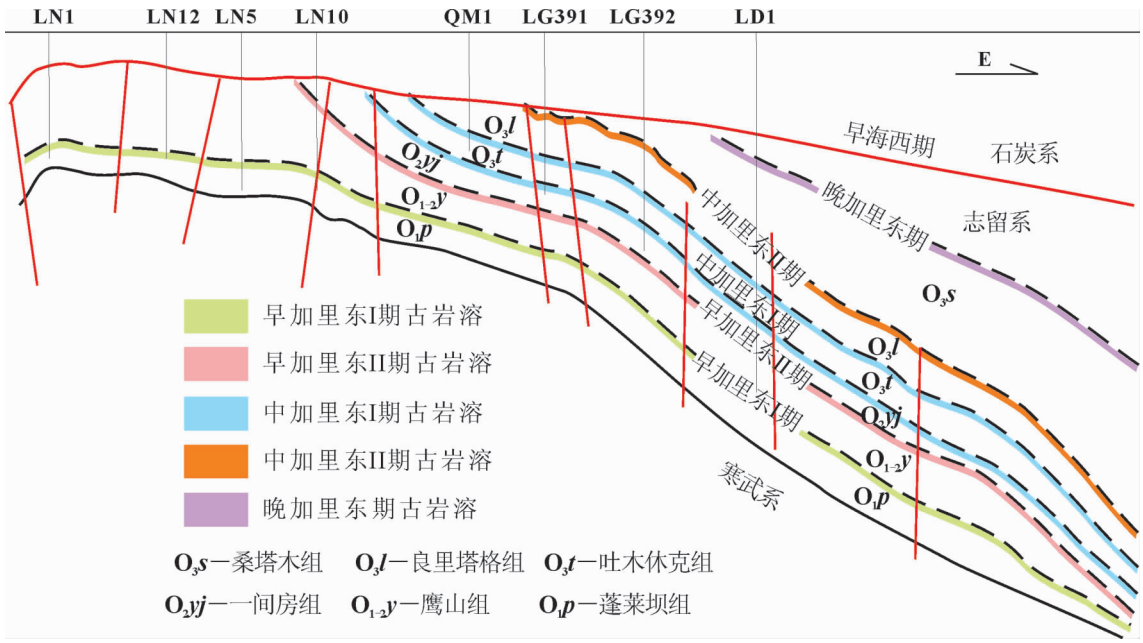


图 4　塔北隆起轮古东地区奥陶系古岩溶期次及叠加模式示意图

Fig.4　Schematic map showing the paleo-karstification periods and superimposed patterns of Ordovician, eastern Lungu area, northern Tarim Basin

较短[13,31],无硅铝质岩石的风化剥蚀,短期暴露不整合面岩溶(层间岩溶)的性质(图 4)。

晚奥陶世中晚期以来,频繁的构造升降,较明显的有两次,第 II 幕发生在上奥陶统良里塔格组(O_3l)和桑塔木组(O_3s)之间[29],O_3s 假整合超覆在 O_3l 不同层位之上,地震剖面上 O_3s/O_3l 间的上超清晰可见[29],且局部区域缺失良里塔格组,反映该期暴露间断的存在,但间断时间不长,该幕岩溶作用具有短期暴露不整合岩溶(层间岩溶)的性质(图 4)。

3.1.3 晚加里东期构造运动与古岩溶

晚加里东期构造运动发生在奥陶系桑塔木组(O_3s)和下志留统沉积之间(图 4),与 T_g^5 不整合面相当。该期岩溶作用由于岩性和气候的影响,风化作用可能不强烈,对中下奥陶统碳酸盐岩的影响较小。

3.1.4 早海西期构造运动与古岩溶

发生于泥盆纪晚期—石炭纪早期的海西早期运动,该期构造运动的地层抬升幅度大,剥蚀的地层厚度大,持续的时间长[31],对中下奥陶统裂缝、孔洞、大型洞穴等储集空间形成、演化和分布影响最为强烈,其中以塔北地区最为显著。海西早期运动的动力源主要与塔里木北的南天山洋俯冲有关,对塔北的影响巨大。作为前陆隆起的塔北抬升、变形、剥蚀,奥陶纪碳酸盐岩剥露及喀斯特化,对整个塔北地区尤其是桑塔木组剥蚀线以北奥陶系碳酸盐岩岩溶缝洞型储层形成具重要意义。

由于上奥陶统桑塔木组是一套隔水层,可以有效阻止海西早期大气水的渗入(断裂不发育区),目前对于在桑塔木组覆盖区内中下奥陶统中的岩溶缝洞形成时期仍有争议。可根据洞穴充填方解石的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 以及包裹体烃类的成熟度(以荧光作大致判别)、均一温度作为辅助指标,进一步判别洞穴形成时期[30]。若洞穴充填方解石的包裹体烃类成熟度、均一温度、$^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(<0.709 400)都较低,则表明是加里东中期形成的洞穴。若洞穴充填方解石的包裹体烃类成熟度中等、$^{87}Sr/^{86}Sr$ 值高(>0.709 400),则表明是海西早期形成的洞穴。若洞穴充填方解石的包裹体烃类成熟度、$^{87}Sr/^{86}Sr$ 值都较高,则表明是海西期之后充填的方解石,但由于充填前有多期洞穴存在,究竟充填的是哪一期洞穴,无法判断。

3.2 埋藏岩溶及风化壳岩溶与准同生岩溶耦合关系

准同生岩溶作用受到海平面升降的控制,一般发育于相对海平面下降期;同时受沉积环境控制,主要发育于潮坪相、潟湖相以及台地内的滩相。例如在英买力地区,这类储层主要分布在其南部的英买 1 井、英买 2 井和英买 3 井区,纵向上主要分布于中奥陶统与上奥陶统之间的吐木休克组中,这与该时期的海平面突然下降是一致的。准同生岩溶型储层一般顺层较稳定分布,可预测性强。

埋藏岩溶作用受埋藏期深部成岩作用的影响,其分布受深埋热液的活动范围控制。埋藏岩溶作用总是沿着前期古风化壳残余孔洞缝系统发生,并往往优先溶蚀各种孔洞和裂缝充填物,使储层孔隙表现出某种继承性。与此同时,这类溶蚀孔洞的形成与烃类的快速及时注入和定位是密切配合的。因而,埋藏岩溶作用是储层形成的最主要作用和直接因素[23]。在平面上,这类储层的分布范围与白云岩型风化壳岩溶储层的分布大致是一致的。这类储层往往有较高的孔隙度和渗透率,以基质准同生岩溶孔叠加后期再溶蚀空洞为特征,均质性相对较好。热液岩溶多发生在深埋阶段和后期盆地反转以及造山过程,在两个构造部位极为发育:一是受断裂控制的台缘前斜坡,在盆地反转过程转为逆冲断层并与壳源基底断裂相连,构成深部热水通道;二是海西期造山阶段,壳源火山热活动上涌携带深部热水,沿着断裂和裂隙溶蚀交代碳酸盐围岩。

风化壳岩溶作用主要受古潜山范围的控制,是后期构造运动导致地层抬升接受晚期大气淡水的淋滤而发育的,其形成的储层一般分布在古潜山面之下。长期隆升风化壳岩溶主要发育于古潜山的核部,而短期暴露不整合面岩溶主要发育于古潜山的斜坡带。塔北地区石灰岩型风化壳岩溶储层主要分布在轮南地区及英买力的英买 4 井、玉东 2 井和红旗 2 井等井区,其原始沉积环境包括局限台地、台内滩和障壁滩相;白云岩型风化壳岩溶主要分布在牙哈地区和英买力的东部地区,其原始沉积环境为台地滩、障蔽滩或局限台地[3,25]。在这些石灰岩型岩溶储层及白云岩型岩溶储层中,均发育强烈的准同生溶蚀作用和准同生后溶蚀作用的印迹。

综上所述,塔北地区奥陶系各类岩溶具有复杂而显著的耦合关系。准同生期岩溶为后期的埋藏岩溶准备了基础通道;随后发育的埋藏及风化壳岩溶则是继承并叠加早期准同生岩溶通道的发育,最终成为潜在的优质储层。一般来说,以准同生岩溶+埋藏岩溶或风化壳岩溶+埋藏岩溶的叠加顺序最常

见。但由于成岩环境演化的特殊性,也会以准同生岩溶+(浅)埋藏岩溶+风化壳岩溶+(中-深)埋藏岩溶的顺序叠加。

4　结论与认识

(1)古岩溶作用是塔北地区奥陶系海相碳酸盐岩储层形成的关键要素之一，主要包括准同生岩溶、埋藏岩溶、风化壳岩溶 3 种不同的岩溶类型。再根据沉积环境、流体性质等将上述主要岩溶类型细分为若干亚类。同生岩溶作用控制早期碳酸盐岩储层的形成与分布，埋藏岩溶作用一般沿原有的孔缝系统进行,是碳酸盐岩储层优化改造的关键因素之一,风化壳岩溶作用是奥陶系碳酸盐岩储层形成的关键作用。

(2)塔里木叠合盆地的多旋回构造演化特点,形成了塔北奥陶纪不同阶段、不同类型碳酸盐岩 6 期古岩溶作用的叠加、改造关系：①早加里东期分 2 期,分别为鹰山组($O_{1-2}y$)/蓬莱坝组(O_1p)之间 I 幕,一间房组(O_2yj)/鹰山组($O_{1-2}y$)之间 II 幕,以短期暴露不整合岩溶(层间岩溶)为主,其次为鹰山组的礁滩型准同生岩溶;②中加里东期分 2 期,分别为第 I 幕的吐木休克组(O_3t)/一间房组(O_2yj)之间的短期暴露不整合为主的岩溶(层间岩溶)和藻礁滩型准同生岩溶,以及第 II 幕的桑塔木组(O_3s)/良里塔格组(O_3l) 之间的短期暴露不整合为主的岩溶 (层间岩溶),其次为礁滩型准同生岩溶;③晚加里东共 1 期:奥陶系桑塔木组(O_3s)和下志留统沉积之间;④早海西期叠加岩溶,以长期隆升不整合面(古潜山)岩溶及埋藏岩溶为主。其中对于塔北地区奥陶系古岩溶储层起重要作用的为加里东中期和海西早期以及早加里东期 II 幕。

(3)塔北地区奥陶系各类岩溶具有复杂而显著的耦合关系。准同生期岩溶为后期的埋藏岩溶准备了基础通道；随后发育的埋藏及风化壳岩溶则是继承并叠加早期准同生岩溶通道的发育，最终成为潜在的优质储层。

参考文献(References):

[1] 刘静江, 刘池洋, 孙红海. 塔里木盆地轮南地区奥陶系沉积储层研究新进展[J]. 中国地质, 2007, 34(3):515-521.
Liu Jingjiang, Liu Chiyang, Sun Honghai. New advances in the study of Ordovician sedimentary reservoirs in Lunnan,Tarim basin [J]. Geology in China, 2007, 34 (3):515-521 (in Chinese with English abstract).

[2] 张涛, 蔡希源. 塔河地区加里东中期古岩溶作用及分布模式[J].地质学报, 2007, 81(8):1125-1134.
Zhang Tao, Cai Xiyuan. Caledonian paleo-karstification and its characteristics in Tahe area, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8):1125-1134 (in Chinese with English abstract).

[3] 顾家裕, 周兴熙, 刘雯林, 等. 塔里木盆地轮南潜山岩溶及油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
Gu Jiayu, Zhou Xinxi, et al. Tarim Basin Lunna Buried Hill and Occurance of Oil and Gas [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2001 (in Chinese).

[4] 闫相宾, 韩振华, 李永宏. 塔河油田奥陶系油藏的储层特征和成因机理探讨[J]. 地质论评, 2002, 48(6):619-626.
Yan Xiangbin, Han Zhenghua, Li Yonghong. Reservoir characteristics and formation mechanisms of the Ordovician carbonate pools in the Tahei oil field [J]. Geological Review, 2002, 48(6):629-626 (in Chinese with English abstract).

[5] 肖玉茹, 何峰煜, 孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究--以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1):75-80, 86.
Xiao Yuru, He Fengyu, Sun Yime, et al. Reservoir characteristics of paleocave carbonates: a case study of Ordovician Paleocave in Tahe Oil field, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1):75-80, 86 (in Chinese with English abstract).

[6] 刘忠宝, 于炳松, 李廷艳, 等. 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, 22(1):103-109.
Liu Zhongbao, Yu Bingsong, Li Tingyan, et al. Sequence development controls on iyngenesis karst of the middle-upper Ordovician carbonate in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22 (1):103-109 (in Chinese with English abstract).

[7] 钱一雄, 何治亮, 邹远荣, 等. 塔里木盆地塔中 I 号带西北部上奥陶统碳酸盐岩同生期岩溶——以顺 2 井为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(2):59-66.
Qian Yixiong, He Zhiliang, Zou Yuanrong, et al. The meteoric diagenesis of the Upper Ordovician carbonate rocks occurred in syn-sedimentary karstification in the No.1 belt of Northwestern Tazhong, Tarim basin-taking the Well Shun-2 as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2):59-66(in Chinese with English abstract).

[8] 钱一雄, 邹远荣, 陈强路, 等. 塔里木盆地塔中西北部多期、多成因岩溶作用地质川地球化学表征——以中 1 井为例 [J]. 沉积学报, 2005, 23(4):596-603.
Qian Yixiong, Zou Yuanrong, Chen Qianglu, et al. Geological and geochemical implications for multi-period and origin of carbonate karstification in the Northwestern Tazhong-taking Well Zhong-1 as an example, Northwestern Tazhong, Xinjiang [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23 (4):596-603 (in Chinese with English abstract).

[9] 钱一雄, Conxita Taberner, 邹森林, 等. 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, 12(2):1-7.
Qian Yixiong, Conxita Taberner, Zou Senlin, et al. 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, 12 (2): 1-7 (in Chinese with English abstract).

[10] 陈景山, 李忠, 王振宇, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报, 2007, 25(6):858-868.
Chen Jingshan, Li Zhong, Wang Zhenyu, et al. Paleokarstification and reservoir distribution of Ordovician carbonates in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6):858-868 (in Chinese with English abstract).

[11] 金之钧, 朱东亚, 胡文暄, 等. 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, 80(2):245-253.
Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica,2006, 80(2):245-253 (in Chinese with English abstract).

[12] 张兴阳, 顾家裕, 罗平, 等. 塔里木盆地奥陶系萤石成因及其油气地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(8):2220-2228.
Zhang Xingyang, Gu Jiayu, Luo Ping, et al. Genesis of the fluorite in the Ordovician and its significance to the petroleum geology of Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8):2220-2228(in Chinese with English abstract).

[13] 鲍志东, 齐跃春, 金之钧, 等. 海平面波动中的岩溶响应——以塔里木盆地牙哈-英买力地区下古生界为例[J]. 地质学报, 2007, 81(2):205-211.
Bao Zhidong, Qi Yaochun, Jin Zhijun, et al. Karst development respondence to sea-level fluctuation: a case from the Tarim area in the early Paleozoic[J]. Acta Geologica Sinica,2007,81(2):205-211 (in Chinese with English abstract).

[14] 吴茂炳, 王毅, 郑孟林, 等. 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩热液岩溶及其对储层的影响[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(增刊 I):83-92.
Wu Maobing, Wang Yi, Zheng Menglin, et al. Hydrothermal fluid karst and influences to reservoir in Ordovician carbonate rocks of Tazhong area [J]. Science in China (Series D), 2007, 37(Supp.1): 83-92(in Chinese).

[15] 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, 30(3):315-319.
Kang Yuzhu. Geological characteristics of the formation of the large Tahe oilfield in the Tarim basin and its prospects [J]. Geology in China, 2003, 30(3):315-319 (in Chinese with English abstract).

[16] 何登发, 周新源, 张朝军, 等. 塔里木地区奥陶纪原型盆地类型及其演化[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 I):126-135.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Zhang Chaojun, et al. The types and evolution of the Ordovician proto-type basin in Tarim area [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Supp.I):126-135(in Chinese).

[17] 孙龙德. 塔里木含油气盆地沉积学研究进展 [J]. 沉积学报,2004, 22(3):408-416.
Sun Longde. Progress of sedimentological research in Tarim basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 408-416(in Chinese with English abstract).

[18] James N P, Choquette P W. Palaeocarst[J]. AAPG, 1985.

[19] 李定龙, 杨为民, 汪才会, 等. 皖北奥陶系古岩溶分期、分类及岩溶岩特征[J]. 淮南工业学院学报, 1999, 19(1):5-11.
Li Dinglong, Yang Weiming, Wang Caihui, et al. Karst-rocks features, types and periods of paleokarst Ordovician in the north of Anhui, China[J]. Journal of Huainan Institute of Technology, 1999, 19(1):5-11 (in Chinese with English abstract).

[20] 李定龙. 古岩溶和古岩溶地球化学概念与研究展望[J]. 高校地质学报, 1999, 5(2):232-240.
Li Dinglong. Paleokarst and paleokarst geochemistry: concepts, current situation and perspectives [J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5 (2):232-240 (in Chinese with English abstract).

[21] 夏日元, 唐建生, 邹胜章, 等. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J]. 地球学报, 2006, 27(5):503-509.
Xia Riyuan, Tang Jiangsheng, Zou Shengzhang, et al. Palaeokarst research of the carbonate oil-gas field and its application to oil-gas exploration and development[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (5): 503-509(in Chinese with English abstract).

[22] 郭建华. 塔北、塔中地区下古生界深埋藏古岩溶 [J]. 中国岩溶, 1996, 15(3):207-216.
Guo Jianhua. On the paleokarst of Lower Paleozoic Group, Tabei and Tazhong regions of Tarim basin [J]. Carsologica Sinica, 1996, 15(3): 207-216 (in Chinese with English abstract).

[23] 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层 [J]. 沉积学报, 2004, 22(2):244-253.
Chen Xueshi, Yi Wanxia, Lu Wenzhong. The Paleokarst reservoirs of oil/gas fields in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22 (2):244-253 (in Chinese with English abstract).

[24] 李振宏, 郑聪斌. 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响——以鄂尔多斯盆地奥陶系为例 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3):247-252.
Li Zhenhong, Zheng Congbin. Evoluation process of palaeokarst and influence to reservoir—a case for Ordovician of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15 (3): 247-252 (in Chinese with English abstract).

[25] 徐国强, 李国蓉, 刘树根, 等. 塔里木盆地早海西期多期次风化壳岩溶洞穴层[J]. 地质学报, 2005, 79(4):557-568.
Xu Guoqiang, Li Guorong, Liu Shugen, et al. Multiple karst cave horizons in the Early Hercynian weathering crust in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2005a, 79(4):557-568 (in Chinese with English abstract).

[26] 刘存革, 李国蓉, 张一伟, 等. 锶同位素在古岩溶研究中的应用——以塔河油田奥陶系为例 [J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1398-1406.

Liu Cunge, Li Guorong, Zhang Yiwei, et al. Application of strontium isotope to the study of paleokarst—A case from Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10):1398-1406 (in Chinese with English abstract).

[27] 刘春燕, 吴茂炳, 巩固, 等. 塔里木盆地北部塔河油田奥陶系加里东期岩溶作用及其油气地质意义[J].地质通报, 2006, 25(9-10):1128-1134.
Liu Chunyan, Wu Maobin, Gong Gu, et al. Caledonian karstification of Ordovician carbonates in the Tahe oilfield, northern Tarim basin, Northwest China, and its petroleum geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9/10):1128-1134 (in Chinese with English abstract).

[28] 康玉柱.塔里木盆地大气田形成的地质条件[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1):21-25.
Kang Yuzhu. Geological condition for forming big gasfields in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22 (1):21-25 (in Chinese with English abstract).

[29] 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5):468-478.
Yu Renlian. Characteristics and significance of the Caledonian karst in the Tahe oil field, the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5):468-478 (in Chinese with English abstract).

[30] 张涛, 云露, 邬兴威, 等. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3):299-303.
Zhang Tao, Yun Lu, Wu Xingwei, et al. The application of strontium isotopes in division of Paleokarst stages in Tahe fiele[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27 (3):299 -303 (in Chinese with English abstract).

[31] 徐国强, 刘树根, 李国蓉, 等. 塔中、塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1):114-129.
Xu Guoqiang, Liou Shugen, Li Guorong, et al. The correlation of tectonic evolution and petroleum geological factors between Tazhong and Tabei paleo-uplift, Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1):114-129 (in Chinese with English abstract).

Paleo-karstification types, karstification periods and superimposition relationship of Ordovician carbonates in northern Tarim Basin

NI Xin-feng[1,2], ZHANG Li-juan[1], SHEN An-jiang[2], PANG Wen-qing[1], QIAO Zhan-feng[2]

(1. *Tarim Oilfield, PetroChina, Korla* 841000, *Xinjiang, China*;
2. *Hangzhou Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou* 310023, *Zhejiang, China*)

Abstract: Karstification is one of the most important elements for the formation of Ordovician marine carbonate reservoirs in northern Tarim Basin. Based on lithology, geophysical data and test data, the authors divided karstification of northern Tarim Basin into three types (penecontemporaneous karstification, buried karstification, weathering karstification) and some subtypes. The penecontemporaneous karstification controls the formation and distribution of the early carbonate rock reservoirs, the buried karstification is always developed along the former pore-fracture systems, and constitutes one of the most key factors for reservoir optimization, and the weathering karstification is the key factor for the formation of Ordovician carbonate reservoirs. As for the characteristics of polycyclic structure evolution of northern Tarim Basin, there exist six periods of paleo-karstification in different superimposing and rebuilding stages and various Ordovician carbonate rocks, of which the most important periods for reservoir karstification are the early Caledonian II episode, the middle Caledonian I and II episode, and the early Hercynian. Different types of karstification in northern Tarim Basin have complex and pronounced superimposition relationship: the penecontemporaneous karstification provided basic pathway for the buried karstification; the subsequent buried karstification and weathering karstification were developed on the basis of succeeding to and superimposing on the former penecontemporaneous karstification and finally became the excellent potential reservoir.

Key words: penecontemporaneous karstification; buried karstification; weathering karstification; karstification period; superimposition relationship; northern Tarim Basin; Ordovician

---

About the first Author: NI Xin-feng, male, born in 1978, doctor, specializes in sedimentology and oil basin analysis; E-mail: nixf_hz@petroChina.com.cn.