

鄂尔多斯盆地北部杭锦旗马家沟组四段碳酸盐岩 储层分布规律

张威^{1,2}, 丁晓琪³, 李春堂², 祁壮壮³

[1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430000; 2. 中国石化 华北油气分公司, 河南 郑州 450000;
3. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610000]

摘要:鄂尔多斯盆地北部灰岩喀斯特储层是近年发现的一种新储层类型,分析其形成机理与分布规律对该地区的天然气勘探意义重大。通过洞穴结构解剖,分析储层与洞穴相的关系;在洞穴测井响应研究的基础上,拉平基准面,研究风化壳古地貌和洞穴层的纵向分布规律,阐释多层洞穴与构造隆升之间的关系;利用地震资料,进行洞穴的分布规律研究。结果表明:①不整合面之下的表层孔洞大多被泥质充填而失去储集能力,远离不整合面的洞穴是喀斯特储层的主要储集空间;②洞顶相和洞穴未充填相是主要的储层发育段;③马四段灰岩发育三层洞穴,洞穴层分布稳定,平面上可对比性强,西部发育程度好于东部,三层洞穴是加里东期盆地北部幕式隆起的结果;④井-震结合对洞穴分布进行预测,北部以大量的落水洞为特征,向南转变为地下暗河;洞穴在平面上呈网状分布,断裂对其影响不大。古潜水面控制着洞穴的分层。马四段多层灰岩洞穴的发育极大地拓展了盆地北部下古生界的天然气勘探范围。

关键词:喀斯特;洞穴;储层;马家沟组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Distribution of paleo-karst reservoirs in Ma 4 Member, Hangjinqi area, northern Ordos Basin

Zhang Wei^{1,2}, Ding Xiaoqi³, Li Chuntang², Qi Zhuangzhuang³

[1. Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430000, China;
2. Huabei Oil & Gas Branch, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450000, China;
3. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610000, China]

Abstract: Karst limestone reservoir, a newly recognized reservoir type with hydrocarbon potential in recent years, is also present in the northern Ordos Basin. Its forming mechanism and distribution pattern are of great significance for future gas exploration in the area. Studies were carried out on samples from the area on the relationship between cavern facies and the reservoir through cavern anatomy, on the paleotopography of weathering crust and vertical pattern of the multiple cave layers through cavity logging and levelling interpretation to explain the relationship between multi-layers of caverns and structural uplift, and on the distribution pattern of caverns based on seismic data. The results show that vugs occurring below the unconformity are mostly filled with clay and fine-grained debris, thus incapable of storing. However, those far away from the unconformity are dominant reservoirs. Cave roof and unfilled cavities are also dominant reservoir space. Three layers of caverns, a result of periodic uplifting in northern part of the study area during the Caledonian, are developed in Ma 4 Member in a steady distribution and good well-to-well correlation. The cavities are more developed in the west of study area compared with the east part. The prediction of cavity distribution by well-seismic correlation indicates that sink holes mostly occur in the north, and underground channels mostly occur in the south. Cavities show a network-shaped distribution in plane view, implying a minor controlling effect by faults. Paleo-water table serves to control

收稿日期:2021-01-07;修订日期:2021-04-07。

第一作者简介:张威(1986—),男,博士研究生、高级工程师,油气地质。E-mail:cupzhangwei@126.com。

通讯作者简介:丁晓琪(1981—),男,博士、副教授,储层地质。E-mail:xiaoqiding@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-001-010);中国石化科技攻关项目(P20043-2)。

the stratification of cavities. The discovery of three layers of cavities in Ma 4 Member broadens the horizon of gas exploration in the northern Ordos Basin.

Key words: karst, cavity, reservoir, Majiagou Formation, Ordos Basin

据估算全球 20% ~ 30% 可采储量与不整合面有关,国内外的许多大油气藏均来自喀斯特储层^[1],如中国的塔河油田、靖边气田、龙王庙气田和任丘油田;哈萨克斯坦的 Kashagan 油气田,美国德克萨斯西部的 Ellenburger 油气田以及阿拉巴马州 Knox 油气田等^[2-4]。岩溶作用是喀斯特储层形成的关键,以塔里木盆地奥陶系多层洞穴为例,将洞穴层归位到早石炭世古地貌剖面中,根据洞穴层沿稳定古潜水面发育的特征,在塔北、塔中、和田古隆起的中-下奥陶统中识别出 3 个期次的岩溶洞穴。岩溶洞穴的发育受古构造(断裂及其伴生裂缝)、岩溶地貌及古水系的控制,洞穴型储层是多次构造运动引起的多期岩溶作用叠加改造的结果^[5-6]。Craig 选用上覆地层的标志层,编制标志层与不整合面之间的厚度图研究古地貌及古潜水面,进而分析洞穴分布规律^[7]。断裂在喀斯特化过程中起着重要的作用,它是大气淡水渗入的通道;同时也可以为溶蚀产物排出的通道。一方面增加喀斯特化的深度;另一方面淡水对断裂及其伴生裂缝的溶蚀可以形成断溶体,喀斯特化深度可达到 1 200 m^[8-9]。灰岩和白云岩由于原始储集空间、溶解度的差别及力学性质的不同,喀斯特化过程也有明显差别^[10-11]。

鄂尔多斯盆地奥陶系喀斯特储层主要发育在中央古隆起东部的岩溶斜坡上,岩性为马家沟组五段的含膏白云岩^[12-14]。含膏白云岩经历淡水淋滤、溶蚀后,形成以晶间孔、裂缝和小溶洞(膏模孔)为主的储集空间,尚未见到大型的洞穴系统^[15]。目前报道的洞穴仅集中在盆地西缘的克里摩里灰岩中^[16-17]。然而,盆地北部在加里东期抬升幅度远大于盆地内部,不整合面下马四段灰岩出露。马四段泥晶灰岩中不发育晶间孔、粒间孔,取而代之的是大的洞穴、裂缝。由于前期的研究主要集中在马五段白云岩喀斯特储层上,对灰岩喀斯特储层的研究甚少。近年来盆地北部进行上古生界致密砂岩气勘探过程中,部分井钻入不整合面下的奥陶系,在马四段灰岩钻遇洞穴,见天然气显示,并获高产工业气流,展示出良好的天然气勘探潜力。然而,对于马四段灰岩中的洞穴是受断裂控制的“断溶”还是受潜水面控制的岩溶尚存争议,平面上钻遇的多层洞穴之间存在什么关系尚不清楚,如何利用地震资料进行洞穴的预测? 由于对洞穴形成机理和分布规律的不清楚,导致后期钻井并未钻遇规模型洞穴,制约了

下一步天然气的勘探。

本次研究根据储集空间进行储层的分类,明确洞穴的剖面结构和电性特征;选择合适的基准面,进行上覆地层的压实校正,研究风化壳古地貌,分析洞穴在纵向上的成层性,阐释岩溶洞穴的形成机理;最后井-震结合,研究不同类型洞穴的地震响应,进行洞穴在平面上的分布研究。

该研究成果的重要意义在于:明确灰岩喀斯特储层的储集空间;阐释多层洞穴的形成机理;明晰马四段洞穴的地震响应及分布规律。

1 地质背景

奥陶纪鄂尔多斯地区属于华北地台的一部分,以中央古陆为界,西侧为祁连陆缘海,东侧为华北陆表海^[18]。盆地北部接收低能的陆表海沉积,地层沉积稳定,下奥陶统马家沟组呈角度不整合覆盖于寒武系、长城系及太古界之上,缺失下奥陶统冶里组、亮甲山组、马一段和马二段(图 1a)。马家沟组自下而上划分为 6 段,马一段、马三段和马五段形成于海退阶段,以白云岩为主,夹厚度不等的石膏和石盐,粘土含量偏高;马二段、马四段和马六段为海侵阶段的产物,以泥晶灰岩为主,含数量不等的白云岩,粘土含量低。

加里东期盆地北部抬升幅度大,地层剥蚀量大,所以不整合面之下开壳层位自南向北依次变老。盆地北部杭锦旗-伊金霍洛旗地区在加里东期不整合面下大面积出露马四段(图 1a),残留地层厚度 0 ~ 80 m,自南向北,地层厚度减薄。现今马四段为一西倾单斜,倾角为 0.5°,局部发育鼻状构造。马四段为一套灰黑色泥晶灰岩(图 1b),形成于潮下开阔海,基质孔不发育,基质孔隙度普遍小于 1%,但多口井钻遇洞穴。

研究区内目前钻遇马四的井有 40 余口,马四段取心井有 4 口,其中两口井在洞穴中取心(锦 77 井和锦 151 井)。

2 储集空间分类

2.1 基质孔

马四段形成于海侵期,为一套低能的泥晶灰岩,向中央古隆起周缘逐渐发生白云石化^[19]。盆地北部杭

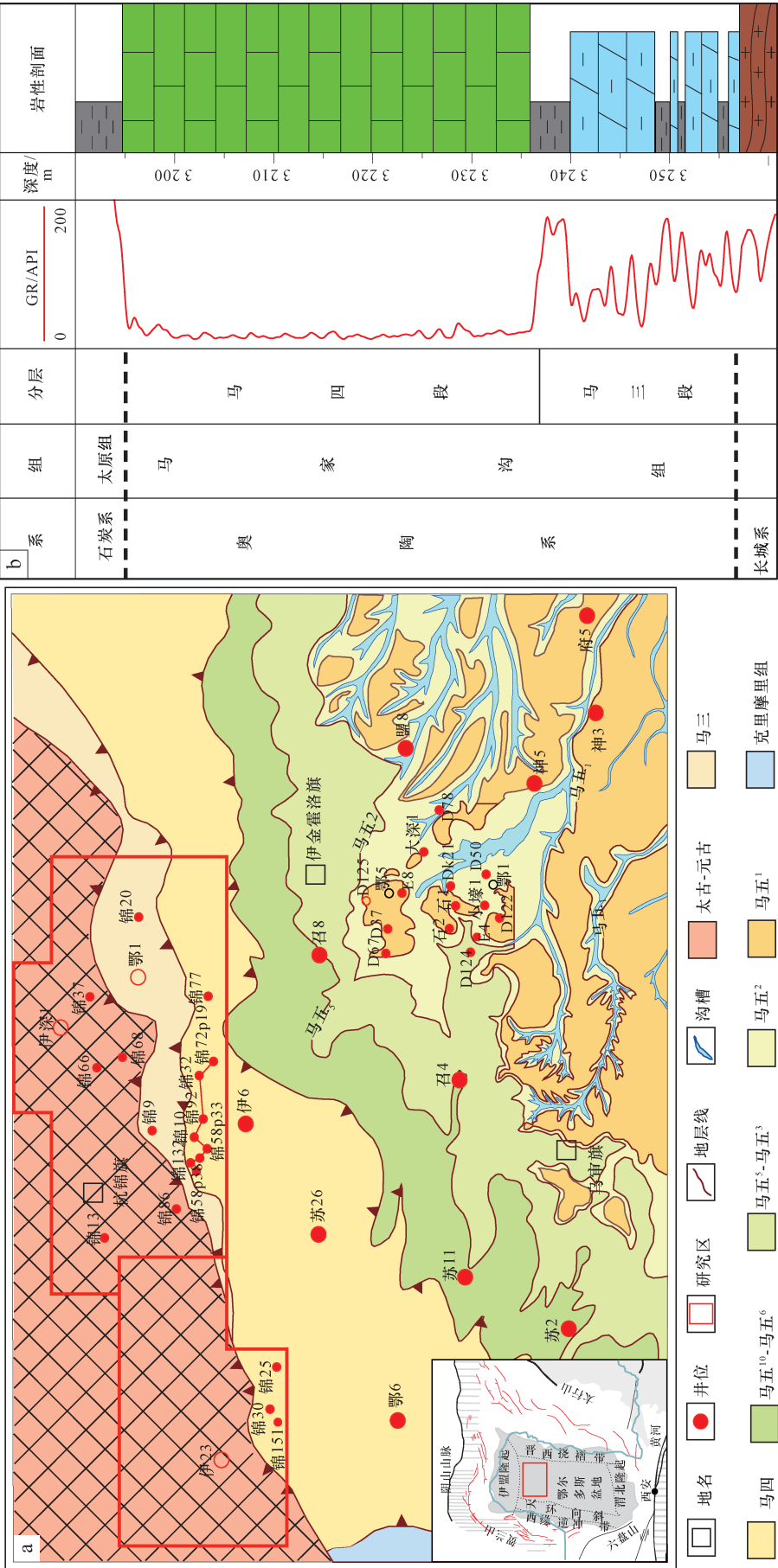


图1 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗前石炭世古地质图及奥陶系地层柱状图
Fig.1 Paleogeologic map of the Pre-Carboniferous and stratigraphic column of the Ordovician in Hangjinqi area, northern Ordos Basin

锦旗地区的马四段普遍没有发生云化,薄片下几乎不见基质孔。

2.2 孔洞、洞穴分布特征

由于喀斯特化,马四段泥晶灰岩中不同程度地发育溶蚀缝、孔、洞,为了研究的方便,参考 Lucia 对孔隙的划分标准^[20],对缝、孔、洞作以下定义。长/宽比值大于 10 定义为缝;长/宽比值小于 10,空隙小于 2 mm 为孔隙,空隙大小 0.2 ~ 25 cm 为孔洞,大于 25 cm 则为洞穴。

2.2.1 风化壳表层孔洞特征

马四段顶部接近不整合处发育厚度 0 ~ 6 m 的喀斯特角砾岩,角砾岩中溶蚀孔洞、裂缝发育,但多被陆源碎屑和风化残积物充填,储集能力有限。这种特征与塔里木盆地塔河油田奥陶系的地表岩溶带非常相似,一般发育在渗流带的上部^[21]。

2.2.2 风化壳内部洞穴特征

马四段内部见多层洞穴分布,洞穴高度最小仅数十厘米,最高可达 20 m。洞穴中 - 下部均不同程度被垮塌角砾或陆源的泥砂沉积物充填,但洞穴的上部往往发育孔洞和裂缝,是马四段储层的主要储集空间。

洞穴一般形成于水平潜流带上部,并进一步发展地下暗河。

3 洞穴剖面结构

3.1 洞穴相

对于喀斯特洞穴,借鉴 Loucks 对洞穴相的划分方案^[22],根据所处的位置及角砾类型将其划分为洞顶相、洞壁相、洞穴未充填相、洞穴垮塌相和暗河沉积物充填相。

洞顶相指洞穴形成期间或形成后,由于应力的释放,顶部岩石发生破裂而形成网状裂隙^[23,24]。同时,地表水长期沿裂隙下渗,裂隙扩溶形成溶缝、孔洞(图 2a,d)。尽管洞顶相中网状裂隙发育,但角砾并没有发生明显位移,以裂缝 - 镶嵌角砾岩为主,裂缝、溶缝及溶洞被方解石或白云石不同程度充填,洞顶相中储层发育,如锦 77 井 2 816.6 ~ 2 819.4 m(图 3)。

洞壁相与洞顶相的形成机理相似,只是一个发育在洞穴的顶部,另一个发育在洞穴的侧面。洞壁相主要由裂纹角砾岩构成,自洞穴向外,裂缝的发育程度逐渐变弱。尽管洞穴的宽度可能不大,但洞壁相的延伸范围可数倍于洞穴^[3]。部分钻井钻遇洞壁相后,经压裂后与洞穴沟通,可以具有很高的产量(如锦 58P38 井)。

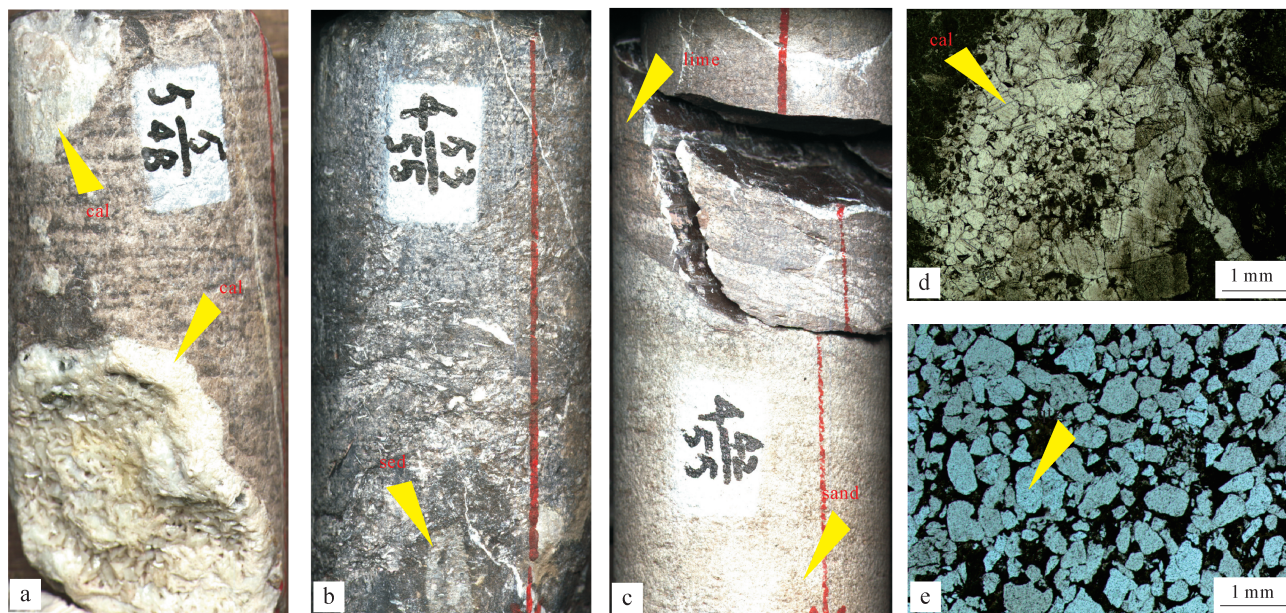


图 2 鄂尔多斯盆地奥陶系马四段洞穴相岩心照片

Fig. 2 Micrographs of cavity facies in the Ordovician Ma 4 Member cores, Ordos Basin

a. 洞顶相,溶缝及溶洞中充填白云石,锦 151 井 3 731.6 m; b. 暗河沉积物,可见大小不等的碎屑角砾,角砾均为灰岩,重力流沉积,锦 151 井 3 730.5 m; c. 下部为暗河沉积的石英砂岩,上部为灰岩宿主岩,锦 151 井 3 728.8 m。cal: 方解石; d. a 的显微照片,可见溶缝 - 裂缝中充填方解石; e. c 下部砂岩的显微照片,石英碎屑具有较好的磨圆度,碎屑之间为粘土
sed. 暗河沉积物; sand. 石英砂岩; lime. 灰岩; qtz. 石英颗粒

洞穴未充填相位于洞顶之下,没有被垮塌角砾和地下暗河沉积物充填的部分,是油气的主要储集空间^[25]。未充填相在洞穴中分布极不均匀,体积有时大,有时小,局部可能不发育,这在现代溶洞中得到很好的显示^[8]。对于洞穴未充填相,往往造成取心收获率低。

洞穴垮塌相位于洞穴底部,大小不等的灰岩角砾相互支撑,大的垮塌角砾可达数米(图 3);角砾之间可以是细小的灰岩碎屑,也可以是泥质。角砾来自洞顶和洞壁,成分相对单一,无分选和磨圆。垮塌相可以充满大半个洞穴甚至整个洞穴。洞穴垮塌相由于粘土和细碎屑充填严重,不发育储层。然而,国外许多大油田的储层主要位于洞穴垮塌相中^[22,24]。

暗河沉积物充填相主要是洞穴砂砾岩,具有流水成因的构造,如平行层理、交错层理、水平层理、粒序层理等,偶尔也可见重力流沉积^[26]。洞穴砂砾岩为地下暗河的沉积物,可以明显分为两种:一种是碎屑颗粒来自马四段的垮塌物,分选磨圆差,成层性不好(图 2b);另一种是碎屑颗粒来自洞穴外,以石英碎屑为主,磨圆较好,与上古生界的沉积物可对比,推测为二叠纪海侵的产物(图 2c—e)。洞穴沉积物充填相可以出现在洞

穴的底部,也可与洞穴垮塌相交替出现(图 3),厚度变化大,平面分布不稳定。该相带由于分选差,粘土含量高,胶结强,储层不发育。

3.2 洞穴剖面结构

从锦 77 井的取心资料来看,该井点位置上洞穴高约 18.7 m,洞穴中部和下部由洞穴垮塌相和洞穴沉积物充填相交替组成,角砾最大直径超过 2.25 m,整个洞穴只有顶部 1.7m 是未充填的。洞顶相中裂缝发育,大气淡水沿着裂缝进行溶蚀形成溶缝、溶沟,白云石沿缝壁进行半充填。一个理想的洞穴自下而上是:交替出现的洞穴垮塌相和暗河沉积物;洞穴未充填相和洞顶及洞壁相(图 3)。

4 古地貌特征

为了研究岩溶储层的空间分布规律,对杭锦旗前石炭世的古地貌进行了恢复。岩溶古地貌决定着下伏地层的保存程度,也控制着喀斯特地层的地表水系和地下水系,古地貌与喀斯特储层发育程度有着密切的联系。

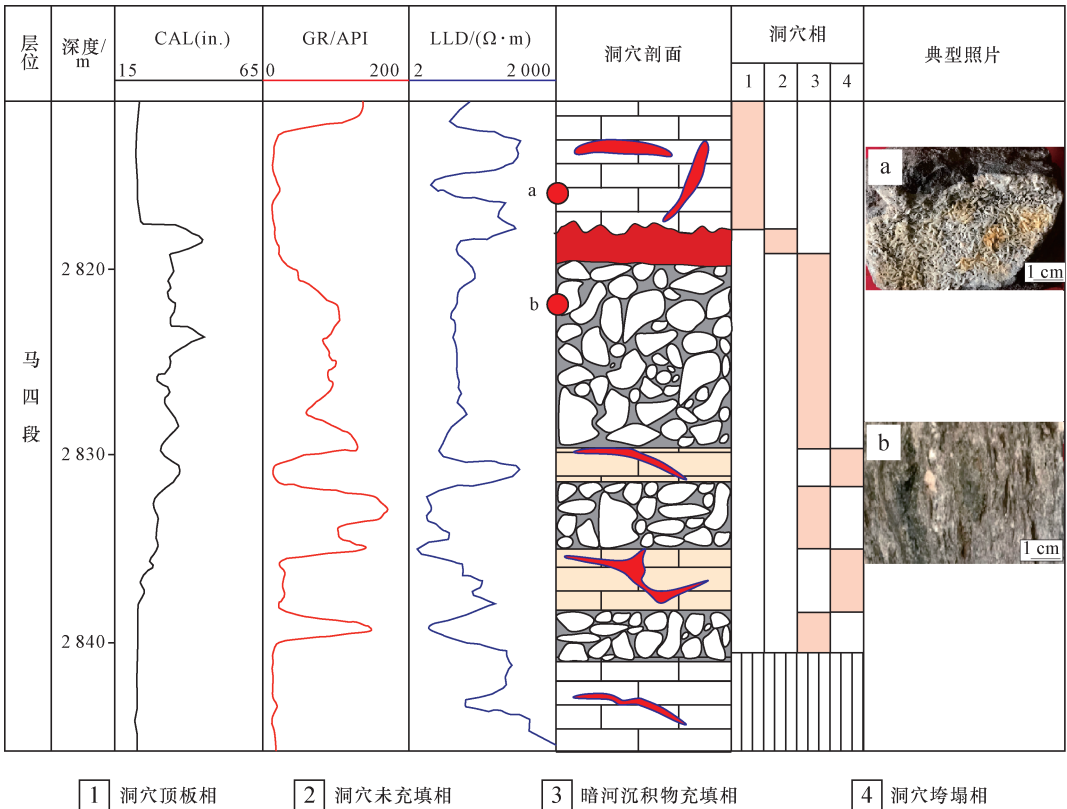


图 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区马四段洞穴剖面结构(锦 77 井)
Fig. 3 Cavity section of the Ma 4 Member in Hangjinqi area, Ordos Basin (Well Jin 77)

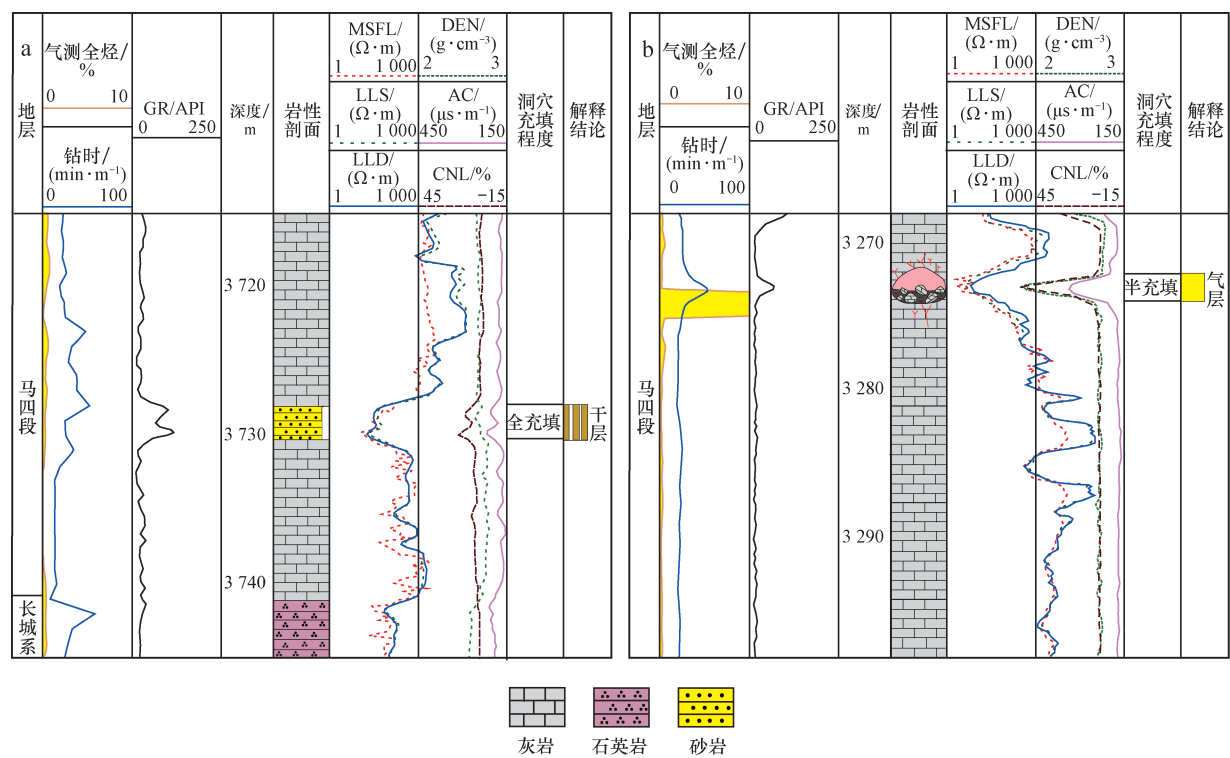


图 5 不同充填程度的洞穴测井响应

Fig. 5 Well log responses of cavities with different degrees of filling

a. 锦 151 井; b. 锦 58P33 井

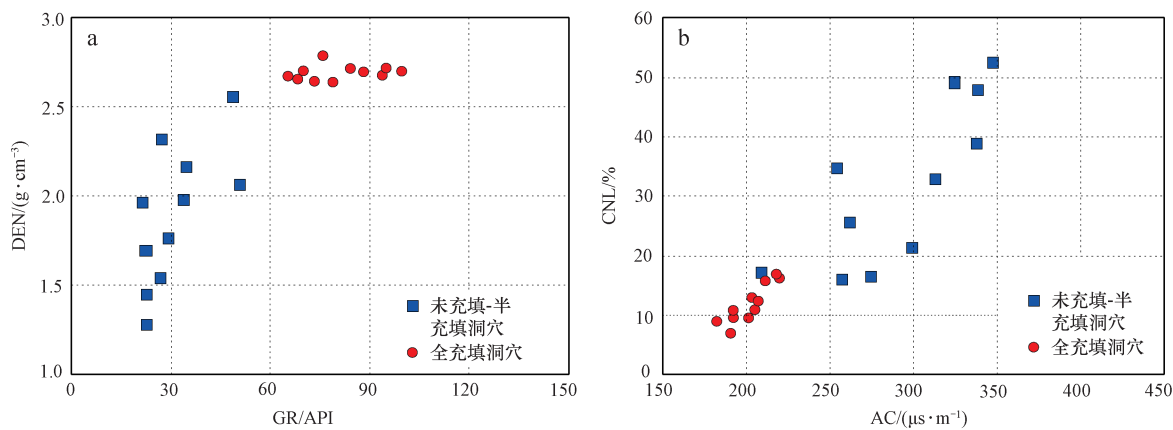


图 6 不同充填程度洞穴的测井响应交汇图版

Fig. 6 Cross plot of log responses of cavities with diverse degrees of filling

a. 伽玛 - 密度交汇图版; b. 声波 - 中子交汇图版

好满足这个条件,煤层在全区均有分布(图 7),可以认为喀斯特地貌已被填平补齐。因此,将煤层拉平之后,洞穴的位置就代表古潜水面的位置。为了消除上覆地层的差异压实影响,还要对基准面与不整合面之间的地层进行去压实厚度校正,这样才能真正反映古潜水面的位置。

5.1.3 洞穴纵向分布规律

按照不同岩性的压实系数,恢复煤层到不整合面

之间的地层厚度。拉平基准面后,从图 7 可以看出,不整合面之下发育三层洞穴,第一层洞穴位于基准面之下 60~70 m 处;第二层洞穴位于基准面之下 85~110 m 处;第三层洞穴则位于 125 m 附近。

由于古地貌起伏较大,三层洞穴离不整合面的距离并无明显规律可寻,但普遍在不整合面下 50 m 范围内。研究区东部由于发育 3 条规模较大的沟谷(图 4),第一层洞穴被剥蚀殆尽,主要发育第二层洞穴;而西部沟谷规模较小,三层洞穴较好地被保存下来(图 8)。

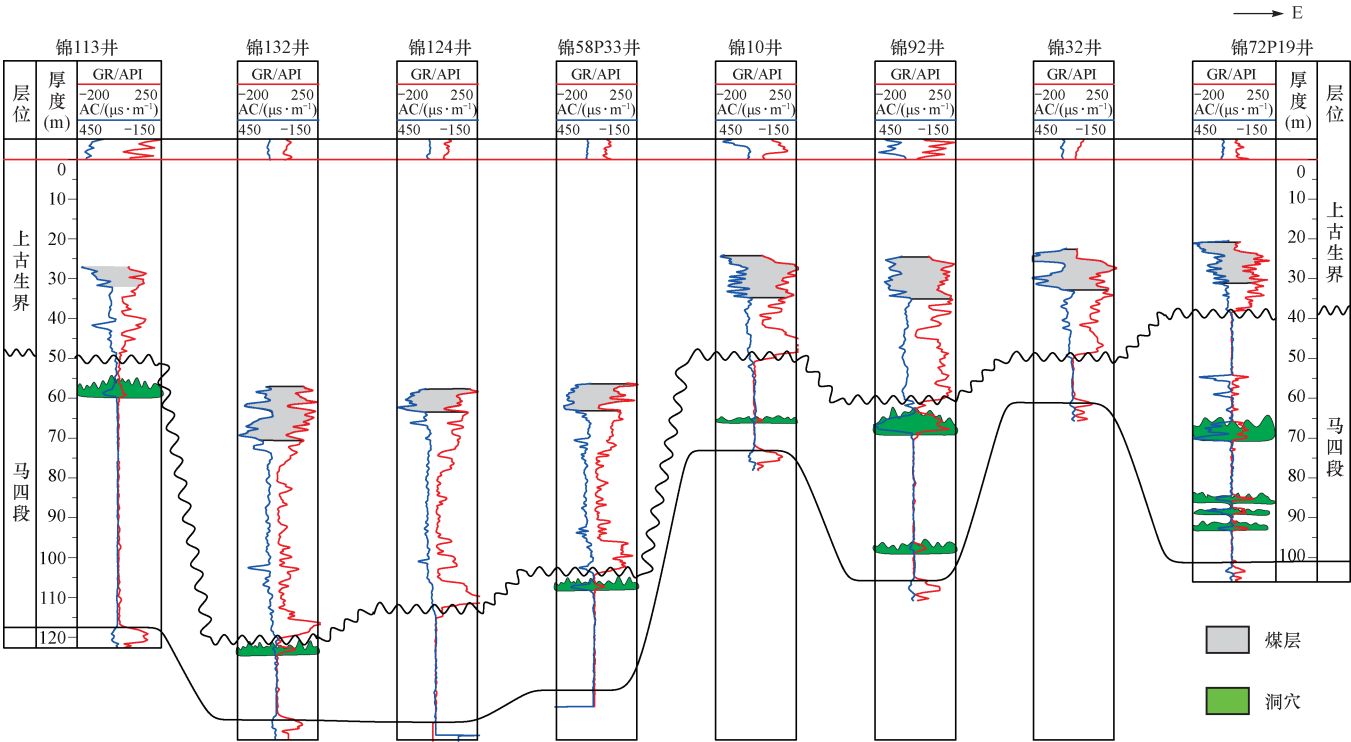


图 7 杭锦旗马四段洞穴分布规律(压实校正后太原组顶拉平)

Fig. 7 Cavity distribution in the Ma 4 Member, Hangjinqi area (flattened top of the Taiyuan Formation after compaction correction)

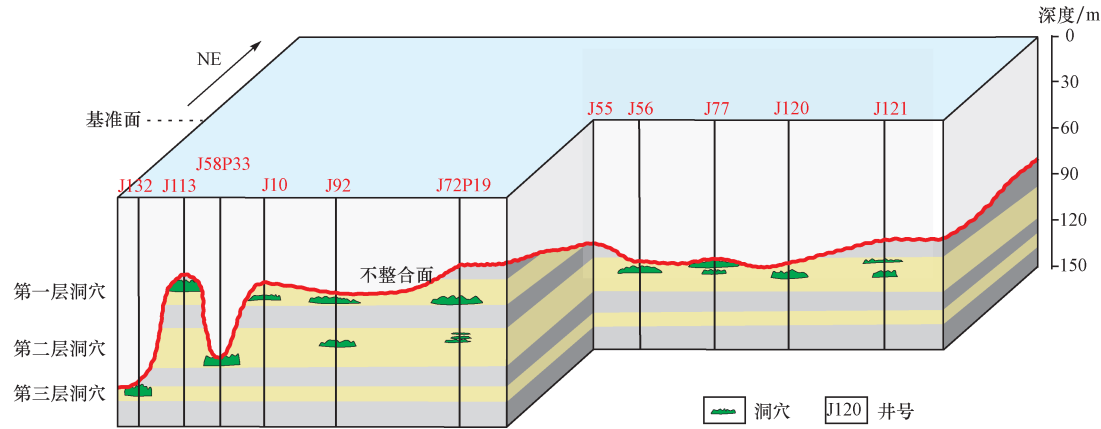


图 8 鄂尔多斯盆地北部马四段洞穴分布规律

Fig. 8 Schematic diagram showing the distribution of the Ma 4 Member cavities in the northern Ordos Basin

三层洞穴的钻遇程度也各不相同,钻遇率分布为 5%、3.5% 和 2%。钻遇率低一方面是因为洞穴宽度较小;另一方面是这些钻井均不是以下古生界喀斯特储层为目的层的。

5.1.4 洞穴形成机理

鄂尔多斯地区奥陶系沉积后,由于加里东运动,盆地整体抬升剥蚀,缺失部分上奥陶统、志留系、泥盆系及部分石炭系,沉积间断达 1.4 亿年。由于鄂尔多斯盆地奥陶系喀斯特化主要发育在马五段上部的含膏白

云岩中,洞穴层的旋回性模糊,加里东运动的期次性表现不明显,不像塔里木盆地加里东运动具有明显的期次性^[6]。盆地北部马四段灰岩洞穴对加里东运动的期次性具有指示作用。

盆地北部加里东期不整合面下为基底花岗片麻岩和元古界长城系石英砂岩,向南过渡为马三段。马三段岩性以泥云岩和泥岩为主,岩性致密,所以在马三段出露区以北,大气降水以地表径流为主,尽管有溶蚀作用发生,但很难有孔洞保留下来。地表水进入马四段后,通过裂隙、落水洞转变为地下水,对石灰岩进行淋

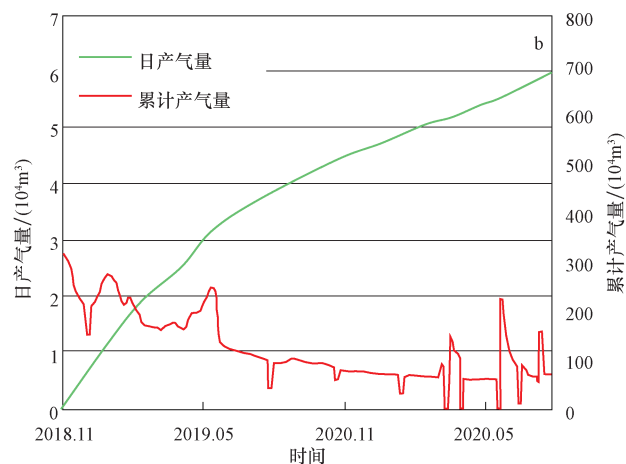
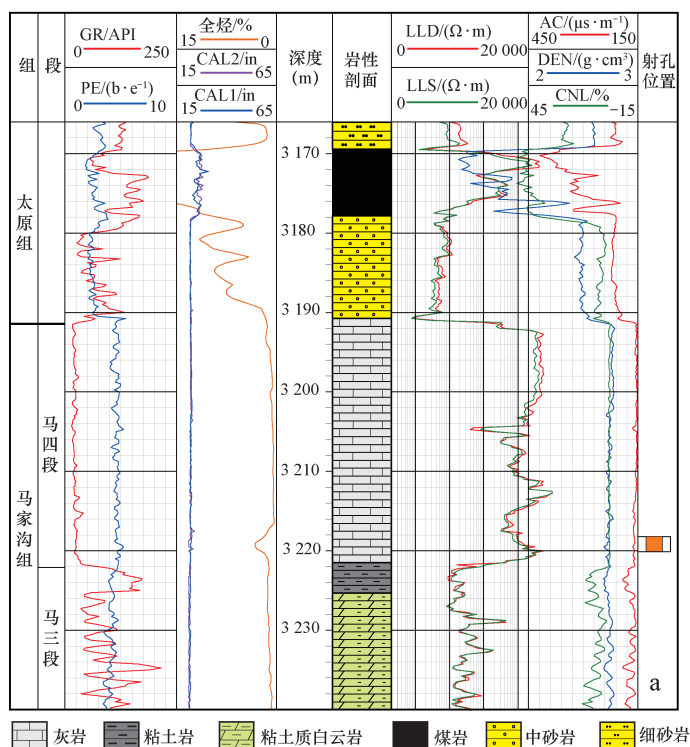


图9 鄂尔多斯盆地北部锦58P38井测井成果及产气曲线

Fig.9 Well logs and natural gas production curves in Well Jin 58P38, northern Ordos Basin

滤、溶蚀。从杭锦旗地区奥陶系的三层洞穴可以得知,加里东运动在盆地北部至少表现为3幕。构造稳定阶段,在潜水面附近形成水平溶洞。随着构造的隆升,潜水面下降,在构造平静期,形成下一层洞穴。由于长时间的暴露,部分沟槽已切穿第一层洞穴,甚至第二层洞穴。盆地北部的洞穴分布规律如图8所示。

锦58P33井在马四段钻遇第二层洞穴(图5b),洞穴高1.2 m,半充填,无阻流量 $19.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。锦58P38井在马四段并未直接钻遇洞穴,但在3217~3219 m处见气显示,常规测井中无明显的孔缝特征(图9a)。压裂试气获无阻流量 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,生产640 d,累计产气 $683 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,压降0.011 MPa/d(图9b)。通过井间对比,推测该井钻遇第一层洞穴的洞壁,洞壁发育高角度裂缝,所以常规测井并不能有效反映;然而裂缝导致录井过程中气测异常,经压裂试气后裂缝与洞穴沟通,因而获工业气流。

5.2 洞穴地震响应与分布预测

5.2.1 洞穴的地震反射波特征

杭锦旗地区奥陶系马四段顶的不整合面在地震剖面上表现为强波峰反射(T9b),是该区古生界典型标志层(图10)。当马四段灰岩发育洞穴时,由于洞穴的地震速度明显低于围岩,同相轴T9b就会产生波形下

拉、错断等异常反射,波形的形态、反射能量主要反映洞穴的尺度、垮塌及充填程度等(图11a)。研究区不同类型洞穴在剖面上有3种反射特征。

当洞穴规模大且严重垮塌,形成地表下切河谷时,奥陶系顶部地震同相轴T9b表现为波形错断,且上部山西组顶部同相轴T9d呈现大幅下拉(图11a中①,②,③位置)。

当洞穴规模较大时,形成落水洞或地下暗河,横切洞穴的同相轴T9b呈现为“V”字型下拉,其下波谷反射局部出现类似“串珠”现象,上部同相轴T9d呈现微幅下拉(图11a中④,⑤,⑥,⑦位置)。

当洞穴规模较小时,往往垮塌范围小或者未垮塌,同相轴T9b呈现为小幅下拉,对上、下同相轴(T9d,T10)影响较小,通常为连续平缓反射(图11a中⑧位置)。

5.2.2 洞穴分布预测

奥陶系顶面地震反射波(T9b)的不连续性是预测洞穴的主要依据,反映这种不连续性的主要地震属性有相干属性、均方根振幅属性、波阻抗属性、结构张量属性等^[30,31]。通过井-震结合,属性优选,认为结构张量属性(图11b)与相干属性(图11c)对本区岩溶缝洞型储层的响应较敏感,能较好地预测该区洞穴的分布。

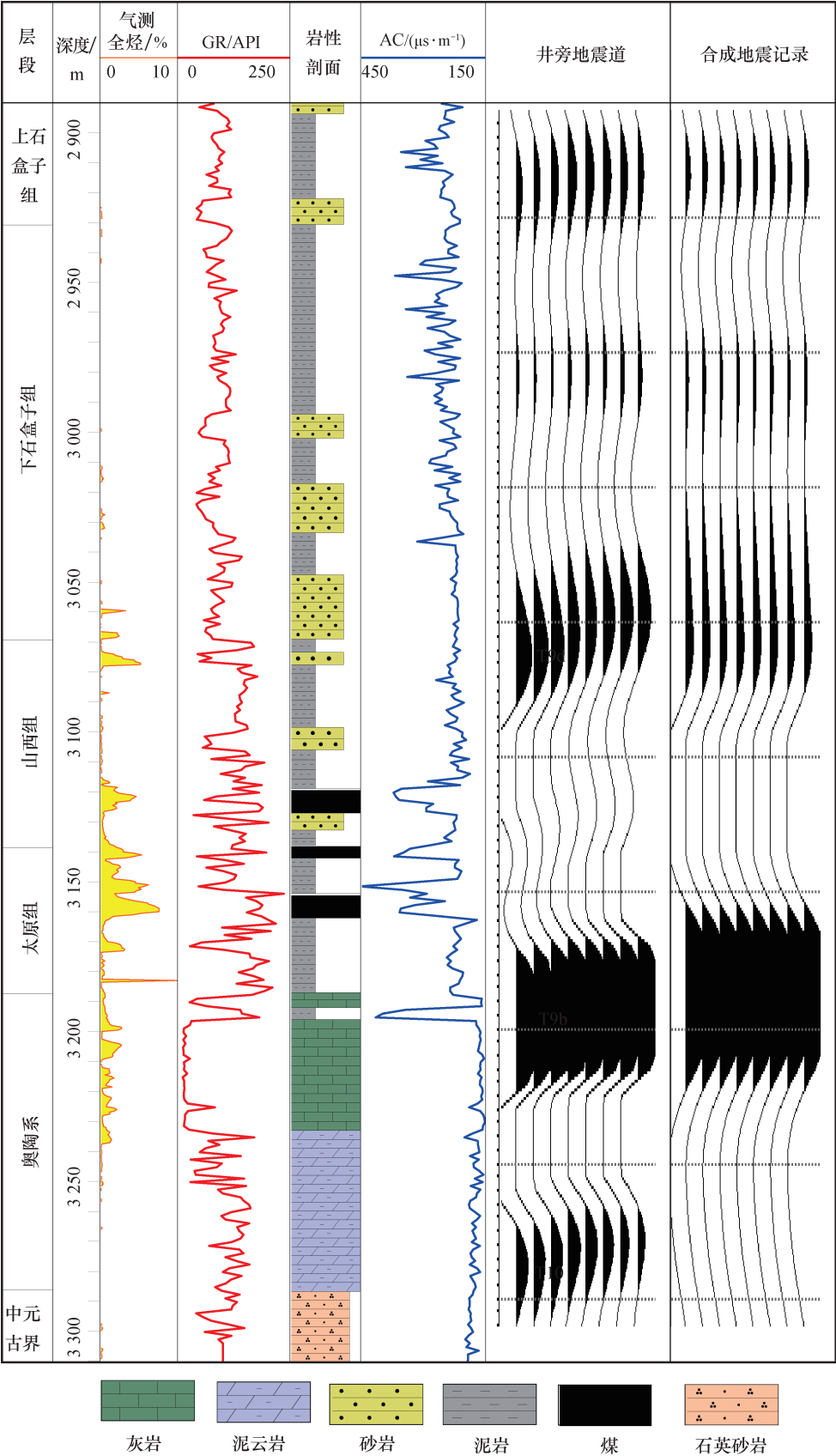


图 10 鄂尔多斯盆地锦 92 井测井 - 地震综合标定图

Fig. 10 Integrated logging-seismic calibration of Well Jin 92, Ordos Basin

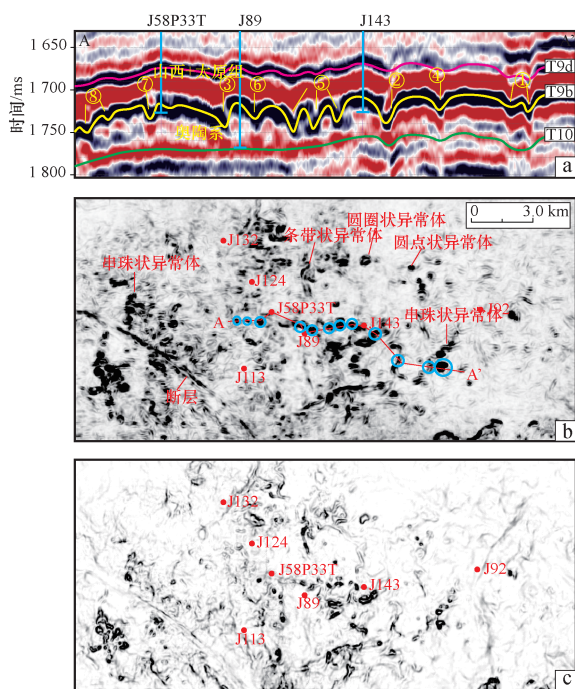


图 11 鄂尔多斯盆地锦 58 井区地震反射剖面(a),奥陶系地震结构张量(b)与相干(c)属性平面图

Fig. 11 Seismic reflection section (a), structure tensor (b), and coherence attributes (c) of the Ordovician in Well Jin 58, Ordos Basin

从地震结构张量属性平面图(图 11b)与相干属性平面图(图 11c)可以看出,研究区马四段洞穴普遍发育,根据属性异常体的平面几何形态,可以划分为两种类型。第一类呈孤立圆点或圆圈状异常体,直径一般为 100~300 m,最大可达 500 m,解释为落水洞及其周边垮塌的综合响应;第二类呈不规则弯曲条带状,宽度为 100~200 m,解释为由地下暗河形成的溶洞。总体来看,北部以第一类为主,大量的落水洞存在,说明地表水通过落水洞转变为地下水。南部以第二类为主,为辫状-蛇曲状的喀斯特洞穴。洞穴没有明显的方向性说明其形成可能与断裂关系不大。以上两种类型的喀斯特体系组成了马四段的洞穴系统,控制了喀斯特储层的分布。

6 结论

1) 洞穴是马四段喀斯特储层的主要储集空间,一个完整的洞穴自下而上包括垮塌相、暗河沉积物充填相、未充填相、洞顶相和洞壁相。洞穴中未充填部分、洞顶和洞壁的裂缝、溶缝、溶洞是主要储集空间。

2) 盆地北部马四段发育 3 层洞穴,分别位于基准面之下 60~70 m, 85~110 m, 125 m 附近。3 层洞穴

的出现说明加里东期,盆地北部至少经历了 3 次构造隆升,形成了 3 个较稳定的古潜水面。3 层洞穴的发现为今后水平井或大斜度井的部署提供了依据。

3) 风化壳古地貌具有北高南低,东西方向上谷-脊相间的特征。由于北部古地貌高,以剥蚀为主,落水洞发育为特征,为地下水的补给区;南部古地貌低,以发育地下暗河为特征。东部由于沟槽发育,第一层洞穴被剥蚀殆尽,主要发育第二层洞穴;西部马四段保存较完整,三层洞穴均有发育。洞穴普遍位于不整合面下 50 m 范围内。

4) 基于洞穴的发育模式,运用结构张量属性和相干属性进行了洞穴平面预测。洞穴在平面上呈辫状-蛇曲状分布,南部较北部发育,洞穴的形成受断裂影响不大,古潜水面是洞穴发育的主要因素。

参 考 文 献

- [1] 王大鹏,白国平,徐艳,等. 全球古生界海相碳酸盐岩大油气田特征及油气分布[J]. 古地理学报, 2016, 18(1): 80~92.
Wang Dapeng, Bai Guoping, Xu Yan, et al. Characteristics and hydrocarbon distribution of the Paleozoic giant marine carbonate rock oil-gas fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(1): 80~92.
- [2] Ronchi P, Ortenzi A, Borromeo O, et al. Depositional setting and diagenetic processes and their impact on the reservoir quality in the late Viséan-Bashkirian Kashagan carbonate platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan)[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(9): 1313~1348.
- [3] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795~1834.
- [4] 胡素云,王铜山. 中国陆上深层大油气田形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
Hu Suyun, Wang Tongshan. Formation and distribution of large on-shore deep oil and gas fields in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [5] 漆立新,云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1~12.
Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1~12.
- [6] 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, 2005, 79(4): 557~568.
- [7] Craig D H. Caves and other features of Permian karst in San Andres dolomite, Yates field reservoir, west Texas[C]. New York: Springer-Verlag, 1988: 342~363.
- [8] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007: 578.
- [9] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义

- 与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207–216.
- Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207–216.
- [10] Choquette P W, James N P. Introduction[C]. New York: Springer-Verlag, 1988: 422.
- [11] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- Huang Sijing. Carbonate Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [12] 丁晓琪, 张哨楠, 潘怀孝, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 210–217.
- Ding Xiaoli, Zhang Shaonan, Pan Huaixiao, et al. Development patterns of collapse-type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 210–217.
- [13] 何江, 冯春强, 马岚, 等. 风化壳古岩溶型碳酸盐岩储层成岩作用与成岩相[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 8–16.
- He Jiang, Feng Chunqiang, Ma Lan, et al. Diagenesis and diagenetic facies of crust-weathered ancient karst carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 8–16.
- [14] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地奥陶系孔洞充填特征分析[J]. 地质论评, 2011, 57(3): 444–456.
- Li Zhenhong, Hu Jianmin. Characteristics of Holes Filling in Ordovician of Ordos Basin[J]. Geological Review, 2011, 57(3): 444–456.
- [15] 付金华, 孙六一, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地古生界海相碳酸盐岩油气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- Fu Jinhua, Sun Liuyi, Feng Qianghan, et al. Marine carbonate petroleum geology and exploration of Lower Paleozoic in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [16] 郑聪斌, 张军, 李振宏. 鄂尔多斯盆地西缘古岩溶洞穴特征[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 27–30.
- Zheng Congbin, Zhang Jun, Li Zhenhong. Paleokarst cave features of the western fringe of Erduosibasin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(4): 27–30.
- [17] 苏中堂, 呼尚才, 刘宝宪, 等. 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组古喀斯特洞穴特征及发育控制因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2016, 43(2): 233–240.
- Su Zhongtang, Hu Shangcai, Liu Baoxian, et al. Characteristics and controlling factors of paleokarst caves in Kelimoli Formation, west Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(2): 233–240.
- [18] 冯增昭. 华北地台早古生代岩相古地理[M]. 地质出版社, 1990.
- Feng Zengzhao. Lithofacies palaeogeography of Early Paleozoic in North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [19] 姚涇利, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 1–12.
- Yao Jingli, Bao Hongping, Ren Junfeng, et al. Exploration of Ordovician Subsalt Natural Gas Reservoirs in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(3): 1–12.
- [20] Lucia F J. Carbonate Reservoir Characterization[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [21] 何发岐. 碳酸盐岩地层中不整合—岩溶风化壳油气田——以塔里木盆地塔河油田为例[J]. 地质论评, 2002, 48(4): 391–397.
- He Faqi. Karst Weathering Crust Oil-Gas Field on Carbonate Unconformity: an Example from the Tahe Oilfield in the Ordovician Reservoir in the Tarim Basin[J]. Geological Review, 2002, 48(4): 391–397.
- [22] Loucks R G, Mescher P K, Mcmechan G A. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(5): 545–564.
- [23] White W B. Geomorphology and hydrology of karst terrains[M]. New York: University Press, 1988.
- [24] Kerans. Karst-Controlled Reservoir Heterogeneity in Ellenburger Group Carbonates of West Texas[J]. Aapg Bulletin, 1988, 72(10): 86–97.
- [25] Fernandez-Ibanez F, Moore P J, Jones G D. Quantitative assessment of karst pore volume in carbonate reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(5): 1111–1131.
- [26] Eliassen A, Talbot M R. Solution-collapse breccias of the Minkinfjellet and Wordiekammen Formations, Central Spitsbergen, Svalbard: a large gypsum palaeokarst system[J]. Sedimentology, 2005, 52(4): 775–794.
- [27] 曹红霞, 吴海燕, 任星民, 等. 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, et al. Karst paleogeomorphology and reservoir distribution pattern of Ordovician in the southeastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 146–155.
- [28] James N P, Jones B. Origin of Carbonate Sedimentary Rocks[M]. New York: John Wiley and Sons, 2015.
- [29] Moore C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Oxford: Elsevier, 2013.
- [30] 李海英, 刘军, 龚伟, 等. 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(3): 107–120.
- Li Haiying, Liu Jun, Gong Wei, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei area[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 107–120.
- [31] 王鹏, 刘军, 顾汉明. 不连续性属性增强技术在顺北地区断控不同尺度裂缝检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(2): 131–137.
- Wang Peng, Liu Jun, Gu Hanming. The Application of Enhancement for Seismic Discontinuity Attributes to Detection of Fracture with Different Scales in Shunbei Area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(2): 131–137.