

文章编号:0253-9985(2010)05-0640-08

鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布

李振宏,胡健民

(中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081)

摘要:利用地层残余厚度法,恢复了鄂尔多斯盆地不同时期的古构造面貌,结合奥陶系岩溶储层的分布特征,分析了古构造演化过程对岩溶储层发育的影响。鄂尔多斯盆地奥陶系沉积时期为中部高、东西低,西陡东缓的古构造面貌,东部缓坡带发育含膏白云岩沉积相带,为古岩溶储层的发育奠定了物质基础。自奥陶系沉积后,缺失了大约 1.3×10^{12} a 的沉积,古构造面貌继承发育,中部古隆起东斜坡带在古地貌上隶属于岩溶斜坡区,水流集中,径流活跃,为风化壳岩溶储层的发育创造了有利条件。自石炭纪本溪期重新接受沉积后,至早、中三叠世奥陶系顶部剥蚀面始终保持了中部高、东西低的古构造面貌,古隆起带是地下活动性流体运移的有利指向区,隆起斜坡带在早期风化壳岩溶的基础上,更有利于埋藏期岩溶的形成。

关键词:含膏白云岩;风化剥蚀面;裸露风化壳期;埋藏岩溶;古构造;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.1 **文献标识码:**A

Structural evolution and distribution of paleokarst reservoirs in the Ordos Basin

Li Zhenhong and Hu Jianmin

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Using residual thickness method, paleo-tectonic features during different periods are recovered in Ordos Basin. Taking karst reservoirs in the Ordovician as an example, this paper also discusses the influence of paleo-tectonic evolutionary process on the development of karst reservoirs. In the Ordovician, the paleo-tectonics of Ordos Basin features in one high between an eastern low with gentle slope and a western low with steep slope. Dolomite with gypsum deposited on the eastern gentle slope, and provided a material basis for the development of paleokarst reservoirs. After the Ordovician, there was a hiatus about 1.3×10^{12} years and the previous tectonics was inherited. From a paleogeomorphic point of view, the eastern slope of the central paleohigh belongs to a karst slope where concentrated water flow and active throughflow provided favorable conditions for the development of karst reservoirs of weathering crust type. From the Carboniferous Benxi period when deposition renewed to the Early-Middle Triassic, the erosion surface on top of the Ordovician kept previous paleo-tectonic features. The paleohigh is believed to be favorable destinations for subsurface active fluids. The slope zones, which experienced karstification of weathering crusts earlier, are favorable for the development of burial karstification.

Keywords: dolomite with gypsum, erosion surface, exposed weathering crust period, burial karstification, paleo-tectonics, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是位于我国中西部地区的典型克拉通盆地,油气资源丰富,近年来油气当量已攀升至中国第三,具有较好的勘探开发前景。盆地的现今构造格局为一向西倾斜的大单斜,这一现

今的构造背景与油气的富集规律之间似乎并不存在着显而易见的联系,特别是位于盆地中部以奥陶系岩溶储层为主的天然气区(图1)^[1~3]。岩溶储层的发育主要决定于古沉积背景、古气候背景

收稿日期:2009-10-09;修订日期:2010-09-20。

第一作者简介:李振宏(1973—),男,博士研究生,石油与天然气地质。

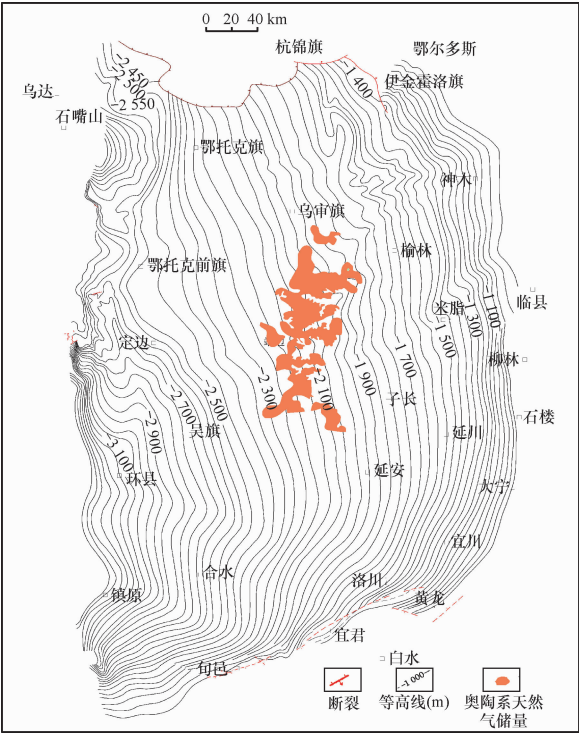


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系顶面构造

Fig.1 Top structures of the Ordovician in the Ordos Basin

和古构造背景。古气候背景对于整个鄂尔多斯盆地来说,应该是大同小异,因此古沉积背景和古构造背景才是决定该地区岩溶储层形成的关键因素。本文对鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶储层发育规律的研究主要是建立在对古构造演化背景分析的基础上,通过对鄂尔多斯古生代各个时期古构造格局的编图,分析了古构造对奥陶系沉积及其岩溶发育规律控制的内在联系。

1 构造演化过程

鄂尔多斯盆地是一个大型的多旋回叠合盆地,在地质历史演化过程中经历了多期次的构造变动^[4]。在不同的地质发展阶段,由于不同的地球动力学背景和构造应力场特征,导致了不同的盆地类型、沉积组合、边界条件和盆山耦合形式,产生了复杂的构造变形。特别是在奥陶系沉积之后,盆地缺失志留系、泥盆系长达 1.3×10^{12} a 的沉积间断,该沉积间断对于奥陶系风化壳岩溶储层的发育起着决定性作用。但同时,奥陶系沉积时期的古构造格局直接决定着碳酸盐岩的沉积相带,不同的沉积相带及岩性特征是古岩溶储层发育的物质基础。因此,对于鄂尔多斯盆地奥陶系

岩溶储层发育规律的研究主要基于两个方面:一是奥陶系沉积时期的古构造背景;二是奥陶系沉积之后其界面在不同时期的演化格局。

1.1 奥陶纪古构造格局

奥陶系的古构造格局是在寒武纪古构造格局的基础上进一步发展起来的,虽然具有继承性稳定发育的特征,但在具体的构造细节上还是存在一定的差别。该两个时期的古构造图都是用当时的地层沉积厚度来反映的。

奥陶系沉积时期鄂尔多斯盆地整体处于“三隆两鞍两拗陷”的沉积格局(图2)^[5,6]。三隆主要指北部的乌兰格尔隆起、西南部的庆阳-黄陵古隆起、东南的韩城古隆起;两鞍主要指乌兰格尔隆起与庆阳-黄陵古隆起之间的南北向展布的鞍部、庆阳-黄陵古隆起与韩城古隆起之间的东西向展布的鞍部;两拗陷主要指东部的米脂拗陷和西部的陶乐-惠安堡-淳化的呈L型展布的拗陷带。该时期与鄂尔多斯盆地寒武系沉积时期的古构造面貌还是有了较大的改观,说明了周缘构造活动对于盆地内部格局的影响在进一步加剧(图3)。

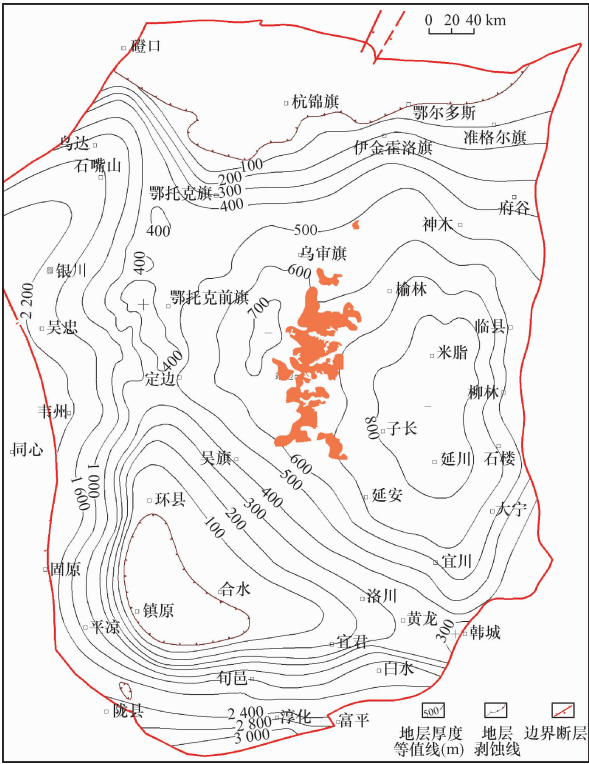


图2 鄂尔多斯盆地奥陶系地层残余厚度

Fig.2 Residual thickness of the Ordovician in the Ordos Basin

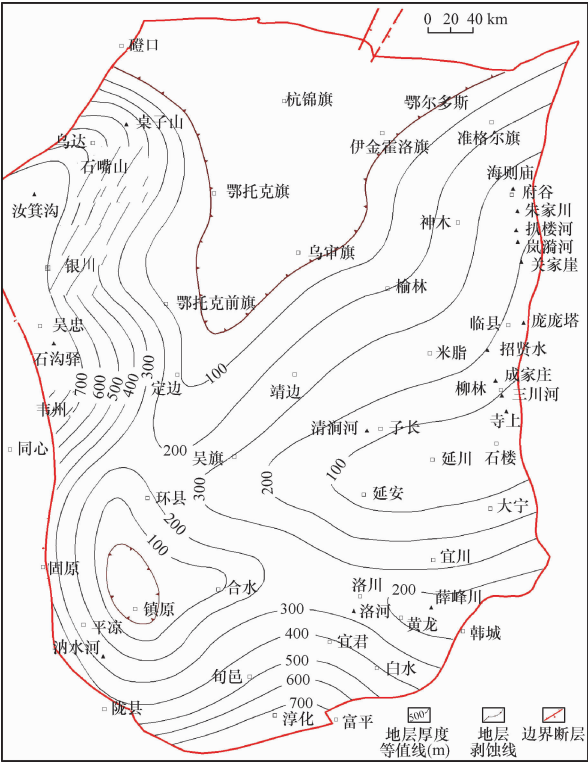


图3 鄂尔多斯盆地寒武系地层残余厚度
Fig.3 Residual thickness of the Cambrian
in the Ordos Basin

虽然该时期仍处于北高南低,中部高、两侧低的构造格局中,但中部隆起带的轴部向西明显偏移,范围较寒武纪明显变小,从而致使南北隆起分割,形成了明显的鞍部带。东部坳陷带范围比寒武系明显扩大,由于周缘都有古隆起的存在,从而形成了一个近于封闭的坳陷带。该时期是古隆起最为发育的时期,隆起幅度超过 800 m,并且宽度变化较大,介于 20 ~ 180 km。南北向古隆起带分割了西部的祁连海域和东部的华北海域,南部的东西向古隆起带分割了北部的华北海域与南部的秦岭海域。

1.2 奥陶系风化剥蚀面的演化

奥陶纪末期,受北部西伯利亚板块和南部扬子板块的影响,中亚蒙古洋壳向南俯冲,秦祁海洋壳向北俯冲,在南北向推挤应力的作用下,鄂尔多斯盆地以致整个华北地区整体抬升,缺失了志留系、泥盆系、早石炭世,长达 1.3×10^{12} a 的沉积间断。在该阶段,鄂尔多斯地区在古纬度上一直处于赤道附近,气候温暖湿润,长期裸露于地表的碳酸盐岩,遭受了风化侵蚀,形成了蔚为壮观的岩溶

古地貌景观。晚石炭世,该侵蚀界面重新接受沉积,开始进入了漫长的地质历史演化过程。根据前人的研究成果,早、中三叠世是鄂尔多斯盆地油气的大量生成期,在油气进入储层之前的这段时间是埋藏岩溶发育的有利时期^[7~9]。因此,该段时间构造界面演化过程的分析对于研究岩溶储层的发育规律是十分必要的。

该阶段奥陶系风化剥蚀面的进一步演化过程主要采取以奥陶系顶面为基准面,上覆各个时期沉积厚度累加的结果,如以本溪组沉积厚度 + 太原组沉积厚度总体上反映了太原组沉积末期奥陶系剥蚀面的起伏形态。根据编图结果进行分析,鄂尔多斯盆地奥陶系顶面自本溪期—晚古生代的石千峰期,总体的起伏形态都没有发生太大的变化,始终表现为中部高、东西低,明显受到晚古生代古构造格局的控制,西部坳陷带沿石嘴山、银川、陇县一带呈近南北向展布,是晚古生代碰撞谷和祁连山前深坳陷的反映(图 4)^[10]。需要指出的是石炭系本溪组的沉积厚度一方面反映了奥陶系顶面在本溪组沉积末期奥陶系顶面的古构造形态,另一方面又从侧面反映了奥陶系剥蚀面在整个风化剥蚀期间的古构造形态。早、中三叠世时期,奥陶系顶面中部隆起带表现出南部狭窄,北部宽缓,北部隆起带呈舌形向南突出。此时,南部隆起带已逐步分化,在合水与洛川之间,东部坳陷带与西部坳陷带已开始逐步相连,仅存在一狭长的鞍部。隆起带的中部在鄂托克前旗—定边之间呈现一浑圆形分布。西部坳陷带呈现狭长的南北向展布,反映了西部前陆盆地雏型的形成。东部坳陷带主体范围已缩小到盆地东南部地区,在米脂以北地区地层等值线较密集,地形较陡。

2 古构造格局对奥陶系沉积体系的控制作用

岩性是岩溶发育的物质基础,岩溶作用与岩石的组分、结构以及岩石的组合类型都有着密不可分的关系。岩石成分(含泥量、矿物组成)和结构构造(透水性)决定了岩石自身的溶解能力和溶解程度。泥质含量高的碳酸盐岩不易发育岩溶。方解石与白云石比较,在裸露或近地表条件下,方解石的溶解速度高于白云石,故在灰岩发育的不整合面易形成洞穴规模大的岩溶。而白

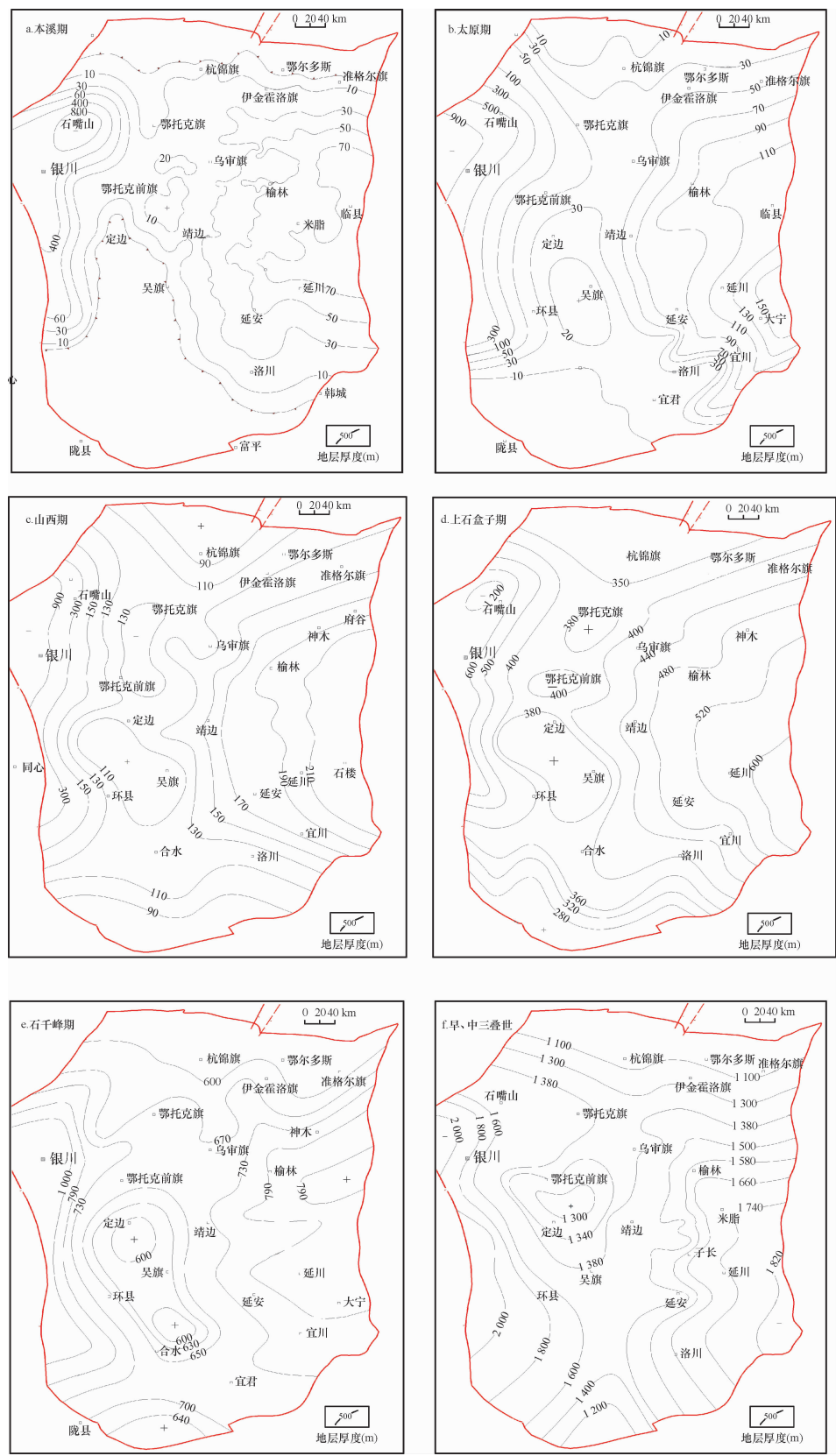


图4 鄂尔多斯盆地奥陶系顶面本溪期一早、中三叠世起伏形态

Fig. 4 Diagram showing structural relief on top of the Ordovician from the Benxi period to the Early-Middle Triassic in the Ordos Basin

云岩或灰质白云岩发育区则以发育小溶洞和溶孔为主。不同岩性的碳酸盐岩层形成的组合类型影响岩溶作用及其特征,在裸露地表环境下具有如下规律:以灰岩为主、少夹层均匀状单一灰岩层的岩石溶解能力强,多溶隙和溶洞;厚层块状均匀状单一白云岩层以溶孔和小孔洞为主,岩溶发育相对均一;当厚 5~20 m 石灰岩与白云岩段互层时,岩溶洞穴一般发育在灰岩层中,白云岩层多构成相对隔水的顶底板;当厚 1~2 m 的灰岩与白云岩薄互层时,不易形成大的洞穴,常沿灰岩层形成选择性的顺层溶蚀。岩性的发育规律主要受控于沉积时期的沉积相带,而沉积相带的空间展布又与当时的古构造面貌息息相关。

鄂尔多斯盆地奥陶系沉积过程中,中部南北贯穿的古隆起带始终控制着奥陶系的整体沉积格局。以古隆起带为界,西部地区属于祁连海域,发育深水盆地相、斜坡相碳酸盐岩,岩性类型以灰岩为主^[11~13]。东部地区属华北海域,发育陆表海碳酸盐岩与局限海蒸发岩交替的旋回沉积。其中,马家沟组一段、三段、五段为局限海蒸发陆棚环境,主要岩性为白云岩、膏盐岩,马家沟组二段、四段、六段为陆表海陆棚环境,主要岩性为泥晶灰

岩、白云岩(表 1)。从目前古岩溶发育的主要层段来看,主要集中发育于马家沟组马五段。马家沟五段沉积时期是鄂尔多斯盆地奥陶系沉积时期的又一次振荡性海退,水体明显变浅,位于盆地中部的南北贯穿的中央古隆起带又重新露出水面。由于华北地台海平面整体降低,沉积底质对海水的消能,使鄂尔多斯盆地主体部位补给的海水相对较少,循环性差,含盐度增高;西部海槽区祁连海水,虽已侵入,但因古隆起阻隔,向中东部边侧盆地的补给十分有限。南部白云岩缓坡的存在,向边侧盆地内补给海水量也不大,且含盐度高。随着古气候的干旱炎热,盆地内蒸发量又大,导致海水含盐度不断升高,造成陆棚盆地坳陷中心沉积了硬石膏岩、盐岩及少量白云岩,形成含白云岩的硬石膏岩、盐岩盆地,围绕膏、盐盆地周边发育盆缘含硬石膏岩的白云岩坪。但随着膏盐盆地面积的不断缩小,总趋势仍然具有退积的特征。中央古隆起以西发育了石灰岩陆棚和石灰岩斜坡,盆地南部渭北地区为硬石膏岩、白云岩缓坡(图 5)^[14]。因为硬石膏更有利于孔洞型储层的形成,受控于中央古隆起带,发育于隆起带东斜坡的盆缘含膏云坪白云岩相带为岩溶储层发育的最有利区域。

表 1 鄂尔多斯盆地奥陶系地层对比

Table 1 Correlation of the Ordovician in the Ordos Basin

国际 方案	本文	西部地层												陇县剖面		中东部地层								南部地层																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		桌子山剖面						平凉剖面			环县剖面			陇县剖面		柳林剖面								鱼车山剖面																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
上 统	上 统													背锅 山组																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

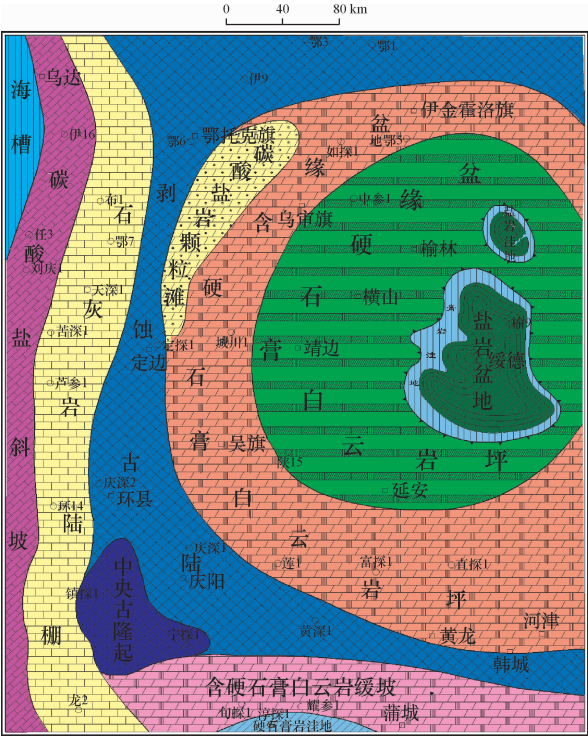


图5 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五期岩相古地理
Fig. 5 Lithofacies paleogeographic map of the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin

3 古构造格局对奥陶系岩溶储层的控制作用

奥陶系顶面的风化壳岩溶储层自奥陶系沉积后主要经历了裸露期和埋藏期两个主要的阶段^[15~22]。裸露期岩溶储层的控制因素与该时期的岩溶古地貌紧密相关,对于岩溶古地貌的划分主要依据上覆石炭系地层的沉积厚度并结合局部的岩溶特征,也就是奥陶系风化剥蚀期的古构造面貌决定着这一时期的岩溶古地貌特征。埋藏期岩溶储层是在裸露风化壳岩溶储层的基础上进一步发育起来的,形成原因主要与埋藏期间地下流体的活动性有关,地下流体的运移方向是这一时期岩溶储层进一步发育的有利地区,而地下流体的运移主要受控于奥陶系顶面重新接受沉积后不同时期的起伏形态。

3.1 裸露风化壳岩溶储层

裸露期风化壳岩溶的分布受控于古地貌、古地质和古水动力条件。因而,古地形的高低、裸露

岩性组合及古水系的分布,决定着岩溶发育的强弱。根据本溪组地层残余厚度反映的奥陶系风化剥蚀期古构造面貌可以看出,当时的古构造特征具有西陡东缓,南北地势相对较高的特点。因此,古水流由中部的岩溶台地向东西两侧的岩溶盆地和岩溶谷地径流(图6)^[23~26]。其中,位于东部的岩溶盆地,也就是古构造的低洼区,是南、北、中水流的重要汇集区,汇水但不排水,缺乏必要的水循环条件,不利于岩溶储层的形成,同时早期形成的孔洞型储层还容易被充填。而位于中部古隆起的东斜坡带,在古地貌上隶属于岩溶斜坡区,水流集中,径流活跃,同时该区又是含石膏白云岩的有利分布区,为岩溶储层的发育创造了得天独厚的条件。岩溶台地也就是古隆起区,由于是区内岩溶水的主要补给区,岩溶作用相对在台地中心发育较弱,一般以水流的侵蚀和沿裂隙渗滤溶蚀为主,发育垂直岩溶管道,水平管道在台地边缘相对发育。

3.2 埋藏期岩溶储层

埋藏期的碳酸盐矿物主要是已稳定化的方解石、白云石。虽然压实作用和埋藏期胶结作用已使岩石孔隙度明显降低,但储层中仍然保存有各种地下流体的渗透通道。随着物理化学、地球化学条件的变化,在埋藏成岩环境中会产生对碳酸盐岩矿物欠饱和的流体或对碳酸盐矿物具腐蚀性的活动性流体,这类流体在碳酸盐岩孔隙-裂隙系统中渗流时可能对碳酸盐矿物发生溶解作用而形成埋藏溶解孔。在沉积盆地有机质热演化过程中能提供足够的富含有机酸及相关的CO₂和H₂S等活性流体的情况下,在碳酸盐岩储层中能否发生埋藏岩溶及埋藏岩溶发育程度还受诸多条件控制。在碳酸盐岩储层内形成足够数量的埋藏溶解孔隙需要有流体大规模的运移。也就是说,一方面是需要有对碳酸盐矿物欠饱和的、有腐蚀性的活性流体大量输入储层,另一方面是被溶解进入溶液的Ca²⁺及Mg²⁺等离子需要不断地传送出去。因此发生埋藏溶解作用的储层应具有相对开放的孔隙系统。而鄂尔多斯盆地奥陶系风化剥蚀面在石炭纪本溪期一早、中三叠世的稳定发育格局,为地下活动性流体向早期的风化壳岩溶储层运移创造了良好的条件,同时早期该区域岩溶孔洞型储层的发育又为储层的进一步溶蚀改造创造了良好的开放环境。

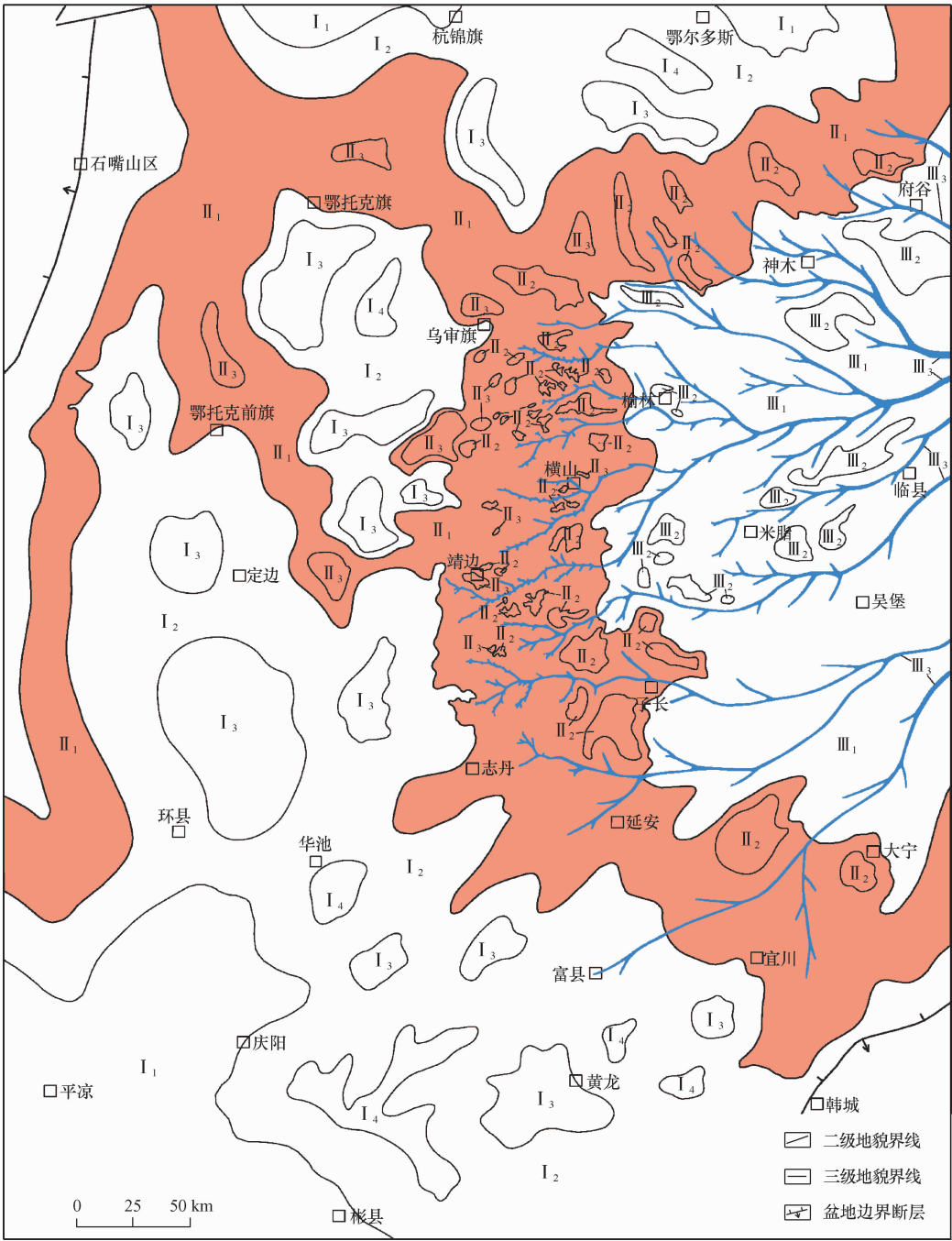


图 6 鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌^[23,24]

Fig. 6 Karstic paleogeomorphology of the Ordovician in the Ordos Basin^[23,24]

I. 岩溶台地: I₁. 高地, I₂. 台地, I₃. 缓丘, I₄. 浅洼; II. 岩溶坡地: II₁. 坡地, II₂. 溶丘, II₃. 洼地; III. 岩溶盆地: III₁. 盆地, III₂. 残丘, III₃. 沟槽

石炭纪海水由东向西持续侵进,首先淹没的是岩溶洼地中相对较低的部位,处于低部位的溶洞被大量的泥砂充填,储集空间所剩无几。其次淹没的是岩溶斜坡和岩溶洼地中的微隆起带,处于斜坡上的沟谷中沉积了泥砂,保存了较好的储集空间。最后被淹没的是岩溶高地,处于高部位的沉积物较

少,孔隙大部分未被充填,储集空间保存较好。从古地形特征来看,这一时期孔隙发育最好的应该是岩溶高地,其次为岩溶斜坡和岩溶洼地中的微地貌,岩溶洼地相对较低的地方储层发育最差。但是由于在岩溶斜坡中存在一个相对较陡的陡坡带(图 7)^[27~29],这一陡坡带海水径流速度快,不利

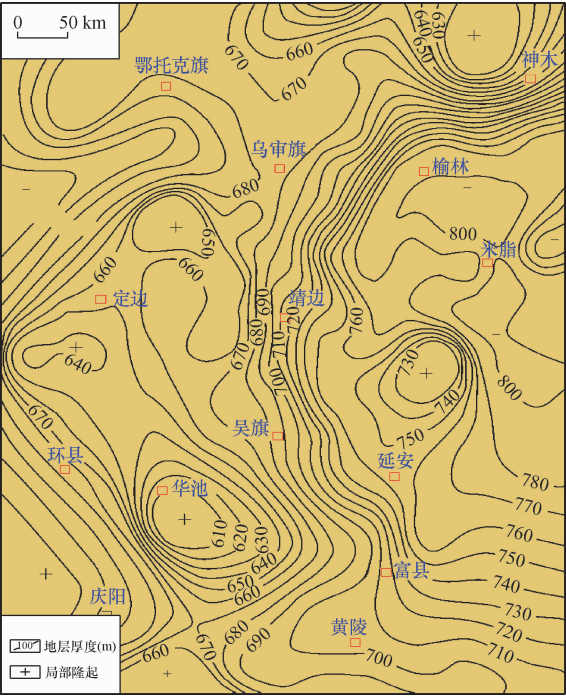


图7 鄂尔多斯盆地本溪—山西组地层厚度

Fig.7 Thickness of the Benxi and Shanxi Formation in the Ordos Basin

于沉积物的保存,因而斜坡带陡坡带位置储层孔隙的保存程度不亚于岩溶高地,而在陡坡带之下,砂泥沉积较多,早期形成的溶蚀孔洞多被充填。

本溪期之后,奥陶系岩溶储层进入了埋藏岩溶发育阶段。在这一阶段的演化过程中,对岩溶储层发育起控制作用的主要是该时期的古水动力运移方向。本溪组沉积之后,奥陶系含水层进入了全封闭状态,其压释水的运移方式主要是通过压力差,经过不整合面向奥陶系岩溶储层补给,而隆起带位置始终处于压释水运移的主要方向。陡坡带位置浅埋藏期间保存较好的溶蚀孔洞,成为压释水强烈交替区,快速流动的水比缓慢流动的水具有更大溶蚀能力,能够将陡坡带溶蚀的物质带到相对较高的位置发生沉淀,因而陡坡带位置为岩溶储层进一步发育的有利场所。而陡坡带之下,裸露风化壳期形成的大量溶蚀孔洞被浅埋藏期的砂泥物质大量充填,阻碍了岩溶作用的进一步发生,进而形成了一个致密带。东部坳陷带虽然具有大量的富有机酸的活动性流体,但是由于早期充填较为严重,埋藏溶解作用处于一个相对封闭的系统之中,溶解的物质不能被携带出去,储层的发育只能集中于局部微隆起带。

参 考 文 献

1 邓起东,程绍平,闵伟,等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报,1999,5(3):13~21

2 吴永平,王允诚. 鄂尔多斯盆地靖边气田高产富集因素[J]. 石油与天然气地质,2007,28(4):473~478

3 何江,方少仙,侯方浩,等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):350~356

4 刘景平,谢仕英,柳克琪,等. 鄂尔多斯盆地的演化叠加与含油性——中国大陆板块内部一个大型盆地原型分析[J]. 石油与天然气地质,1986,7(4):356~366

5 解国爱,张庆龙,郭令智. 鄂尔多斯盆地西缘和南缘古生代前陆盆地及中央古隆起成因与油气分布[J]. 石油学报,2003,24(2):192~195

6 解国爱,张庆龙,潘明宝,等. 鄂尔多斯盆地两种不同成因的古隆起及其在油气勘探中的指导意义[J]. 地质通报,2005,24(4):373~377

7 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. 石油学报,1995,17(1):17~24

8 李元昊,刘建平,梁艳,等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组低渗透岩性油藏成藏物理模拟[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):706~712

9 周文,苏复义,戴建文. 鄂尔多斯盆地曙光地区延长组低丰度油藏成藏机理[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):330~336

10 席胜利,李振宏,王欣,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2006,27(3):405~412

11 付金华,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶纪北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J]. 古地质量,2001,3(4):25~34

12 冯增昭,鲍志东,张永生,等. 鄂尔多斯奥陶纪地层岩石岩相古地理[J]. 北京:地质出版社,1998. 1~144

13 冯增昭,陈继新,张吉森. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[M]. 北京:地质出版社,1991. 5~120

14 董兆雄,赵敬松,方少仙. 鄂尔多斯盆地南部奥陶纪末端变陡缓坡沉积模式[J]. 西南石油学院学报,2002,24(1):50~54

15 李振宏,郑聪斌. 古岩溶演化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

16 夏日元,唐建生,关璧珠,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集规律[J]. 石油与天然气地质,1999,20(2):133~136

17 贾振远,蔡忠贤,肖玉茹. 古风化壳是碳酸盐岩一个重要的储集层(体)类型[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1995,20(3):283~289

18 郑聪斌,冀小林,贾疏源. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳岩溶发育特征[J]. 中国岩溶,1995,14(3):280~288

19 郑聪斌,王飞雁,贾疏源. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳岩溶岩及岩溶相模式[J]. 中国岩溶,1997,16(4):351~361

20 范嘉松. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素[J]. 地学前缘,2005,12(3):23~30