

鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系马家沟组 古水系识别及其意义

高 辉, 黄中群, 马百征

中国石化华北油气分公司勘探开发研究院

摘 要 古水系的研究对碳酸盐岩溶储集体的勘探开发有重要意义。在古地貌恢复的基础上,综合利用趋势面法、地震分频相干属性分析、叠加剖面的精细相干属性分析、沿风化壳层面提取的RGB混频分色等技术,对鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系马家沟组的古水系进行精细刻画。研究结果表明:①研究区处于海西早期岩溶作用区,整体呈西南高、东北低的特征,古地貌可以划分为残丘、台地、阶坪和沟槽4个三级地貌单元。②研究区发育地表及地下2类古水系。地表水系发育于西南构造高部位(西南地区),呈近对称的树枝状,以深切曲流为主;地下水系发育于东北构造低部位(东北地区),以暗河、伏流为主,岩溶作用更强,多垮塌,见落水洞。地表与地下水系共同形成深切曲流—伏流型发育模式。③岩溶残丘、台地是优质储层发育的有利区域。本文采用多种方法刻画古水系,改善了单一技术的局限性,多形态特征结合提升了地表水系、地下水系识别的可信度,确定了优势储层的发育部位,对研究区下古生界的勘探开发有重要参考意义。

关键词 古地貌; 古水系; 岩溶储层; 马家沟组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.3 **文献标识码**: A

引用: 高辉,黄中群,马百征. 鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系马家沟组古水系识别及其意义[J]. 海相油气地质, 2024, 29(4): 361-371.

GAO Hui, HUANG Zhongqun, MA Baizheng. Identification of paleodrainage systems and its significance of the Ordovician Majiagou Formation in Fuxian area, Ordos Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(4): 361-371.

0 前 言

近年来,鄂尔多斯盆地富县探区天然气勘探取得较大的突破,在下古生界奥陶系马家沟组顶部的风化壳储层中探明天然气资源总量超过 $7\ 600\times 10^8\text{ m}^3$,已提交控制储量约 $700\times 10^8\text{ m}^3$ 、预测储量超 $270\times 10^8\text{ m}^3$ 。截至2023年11月,古生界已完钻井66口,单井日产气量最高可达 $4.85\times 10^4\text{ m}^3$,勘探潜力十分巨大。前期研究认为,古生界马家沟组主要为一套海相碳酸盐内陆棚间蒸发岩沉积,其中马五段发育了大量的硬石膏岩-盐岩-白云岩的蒸发岩组合,经历了多期次的构造演化和叠加,古水系较为发育,且经历了强烈的岩溶作用改造,地层垮塌严重。随着勘探开发的进行,逐渐发现这套岩溶储层较薄、孔渗低、非均质性极强,井间差异较大,受古水系控制作用十分明显,产量极不稳定,给勘探开发带来较大难题^[1-2]。因此要对这类岩溶储层进

行准确预测和精细描述,古水系的精确识别显得尤为重要。

古水系包括地表水系和地下水系,受古水系结构的影响,其岩溶作用在不同的区块具有显著的差异,这种差异与各个区块独有的古水系分布有着密切的联系。但迄今为止,富县地区还未精细刻画出全区范围内的古水系结构。本文在前人工作的基础上,充分吸纳最新地质成果和地震解释资料,结合研究区古地貌恢复,应用多种地球物理古水系识别技术,开展富县地区古水系结构精细刻画工作,研究古水系结构分布规律,为下一步的天然气勘探提供重要依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块的西缘。在寒武纪和早一中奥陶世,鄂尔多斯盆地除北部为古陆外,其他区域均为陆表海碳酸盐沉积,残余厚度不

收稿日期: 2024-04-17; 改回日期: 2024-07-03

本文受中国石化科技项目“富阳区块油气接替目标评价与开发关键技术”课题(编号:P22179)资助

第一作者: 高辉, 硕士, 副研究员, 主要从事岩溶储层研究工作。通信地址: 450006 河南省郑州市中原区陇海西路199号中国石化华北分公司; E-mail: gaoh.hbsj@sinopec.com

一^[3-4]。至晚奥陶世,盆地因西侧的贺兰裂谷拉张作用,古构造面貌发生了较大变化,整体上处于“三隆两鞍一坳陷”的古地貌格局,沿着杭锦旗—乌审旗—庆阳一带发育大型古隆起带,呈“L”形展布,构成了秦祁海与鄂尔多斯地块的水下屏障^[5-6]。海西期盆地内部西南缘构造抬升,遭受了较长时间的侵蚀,形成了河谷纵横、残丘广布的古地貌特征,加之可能受到北东向的富县—柳林基底断裂活动联合作用的影响,形成了西南高一东北低、东南高一西北低的主要构造格局。最后在白垩纪,区域构造运动使得鄂尔多斯盆地与华北地台逐渐分离,形成独立的一个盆地^[7-8]。

研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东南部(图1a),在加里东旋回晚期构造挤压的作用下,盆地

整体抬升遭受了150 Ma的风化剥蚀,致使上奥陶统、志留系、泥盆系和下一中石炭统在盆地内缺失^[9]。奥陶系沉积时受“L”形中央古隆起的影响,马家沟组地层厚度偏薄,纵向上划分为6个层段,即马一段至马六段,其中马五段可再细分为10个亚段。由于海西期岩溶作用主要改造马五₁亚段及其之上的地层,马五₁亚段及其之下的地层未受到此期岩溶作用的影响或影响极弱^[10],因此本次研究的目的层段主要集中在马五₁亚段—马六段(图1b)。目的层上覆地层为石炭系本溪组的黑色碳质泥岩,风化壳残余地层主要为马六段和马五段的白云岩、泥晶白云岩、膏质白云岩、灰质白云岩及呈夹层状的泥晶灰岩(图1b),垂直裂缝和高角度网状缝发育,构成地表水向下渗透的通道,但后期多被泥质和方解石充填^[11]。

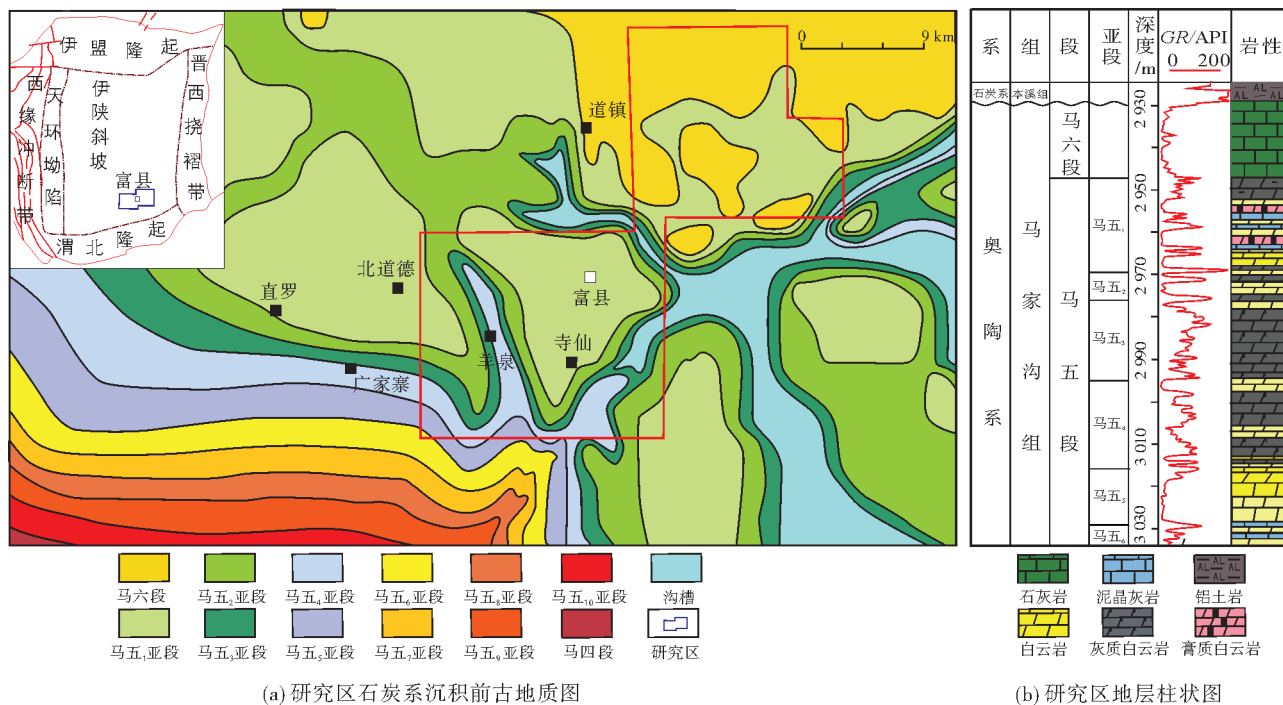


图1 研究区古地质图及地层柱状图(据文献[11],有修改)

Fig. 1 Paleogeological map and stratigraphic column of the study area (cited from reference[11], modified)

2 古地貌恢复

古地貌对于盆地内部沉积水系的平面展布和演化具有控制作用,盆地不同构造演化阶段的可容纳空间及沉积物供给量对古水系结构的发育也有着较大的影响^[1]。目前主要的古地貌恢复方法有印模法和残余地层厚度法(简称残厚法)。印模法需要在上覆地层中找到一个稳定且在地震上较易追踪的可靠界面作为标志层。结合研究区沉积现状,

分析认为富县地区在本溪组—山西组沉积时期,经历了较大规模的差异沉降,因此本溪组底(T9)到山西组顶(T9d)的厚度不能真实反映表生期古地貌特征,故利用印模法恢复表生期岩溶古地貌是不合适的。残厚法是假设在风化壳之下存在一个比较稳定的沉积界面,该界面之上地层沉积后,研究区处于近于水平的状态,那么风化壳与该稳定界面之间的地层为剥蚀之后残存的地层,残存地层厚度反映了岩溶期的地貌特征。马五₁亚段沉积时期研究区

整体处于水侵期,沉积较平缓,且马五₆亚段的顶(T10e)是距风化壳最近的连续地震反射轴,可作为标志层,故可以依据其利用残厚法进行表生期古地貌恢复。通常认为当马五₁₋₅亚段+马六段地层残余厚度较大而上覆本溪组—山西组充填沉积厚度较小时,为相对岩溶正地形;当马五₁₋₅亚段+马六段地层残余厚度较小而上覆本溪组—山西组充填沉积厚度较大时,说明侵蚀作用较强,为相对岩溶负地形;当马五₁₋₅亚段+马六段地层保存较全,残余厚度较大,而上覆本溪组—山西组充填沉积厚度比周围有明显增大时,表明该区处于构造低部位;当马五₁₋₅亚段+马六段地层不全,残余厚度较小,而上覆本溪组—山西组充填沉积厚度也较小时,表明该区处于构造高部位。

结合区域地质分析,研究区整体位于二级地貌单元岩溶斜坡,呈西南高、东北低。受中央古隆起影响,岩溶坡地位于研究区外的西南角,出露地层为马五₄—马五₁₀亚段,上覆本溪组较薄,位于构造高部位,古地貌整体较高,但地势相对平缓^[1]。研究区内的西南方向一带为相对岩溶负地形,马家沟组残余地层不全,且上覆本溪组、太原组充填较薄,表明该区后期抬升,遭受了强烈的侵蚀作用,从西南向东北方向古地貌呈现相对岩溶负地貌—岩溶正地貌—岩溶负地貌—岩溶正地貌的变化,表明研究区差异性

溶蚀作用强烈。根据古地貌识别标准,研究区内可划分出残丘、台地、阶坪、沟槽4类三级古地貌单元。岩溶残丘主要分布在研究区中部和东北部地区(图2b),多发育峰丛和冲蚀沟,马家沟组地层保存较完整,马五₁₋₅亚段+马六段残余厚度为42~55 m(图2a),上覆地层较周围地区明显增厚,表明该区位于构造低部位,古地表遭受侵蚀作用相对较弱。台地、阶坪为残丘和沟槽之间的过渡带,环岩溶残丘发育(图2b),地层残余厚度为30~42 m(图2a),台地地形起伏和地层残余厚度大于阶坪小于残丘,山体夷平面高程相近,发育溶蚀沟。阶坪地形、地势则相对平缓,发育少量岩溶洼地。沟槽(即古水系)在研究区较为发育,共有4支(R₁—R₄),随着时间的推移和地质结构的不同而表现出不同的水文特征。其中西北部发育2条单支水系(R₁和R₄):R₁近南北向,规模中等,延伸较长;R₄为南西—北东向,规模较小,切割北部残丘。东南部发育2条树枝状水系(R₂和R₃),呈南西—北东向,主干水系整体延伸较长,支流与主干水系夹角一般小于90°,个别支流再生细流,整体结构对称。从整体结构上看,R₂和R₃可能为同一支古水系,但是研究区东南部缺少资料,故暂时将其看作2条古水系。沟槽地层残余厚度一般小于30 m(图2a),呈相对岩溶负地形,主要是古水系发育过程中不断对河床底部进行侵蚀,导致其残余厚度减薄。

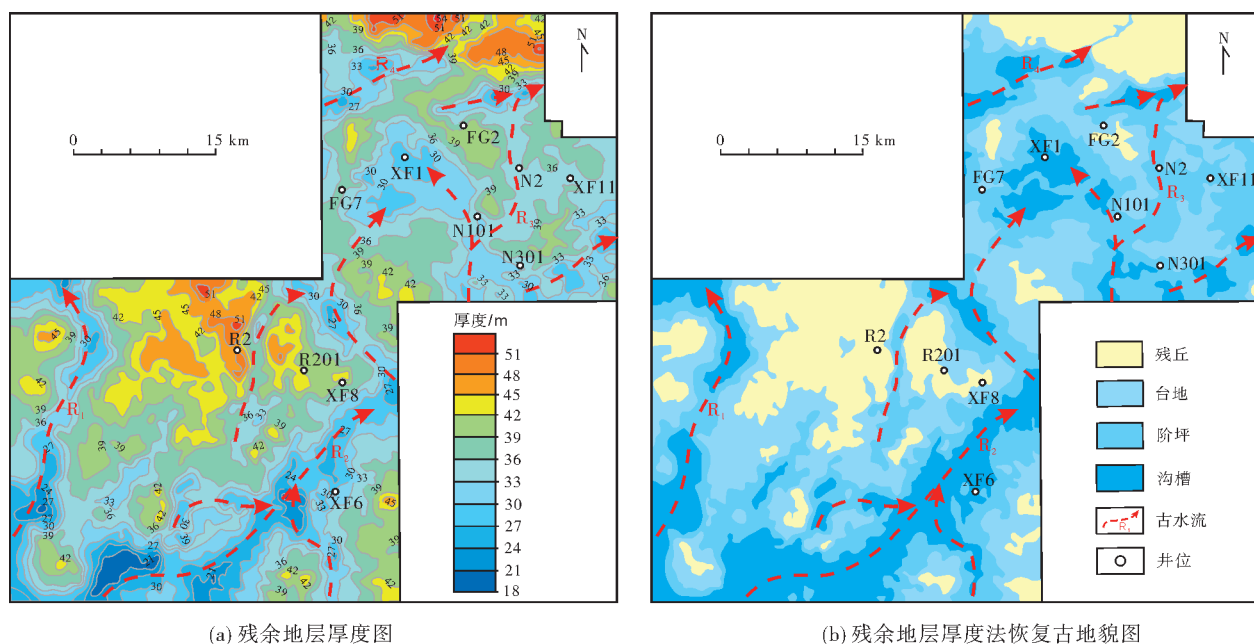


图2 富县地区马五₁₋₅亚段+马六段残余厚度图与恢复的古地貌图

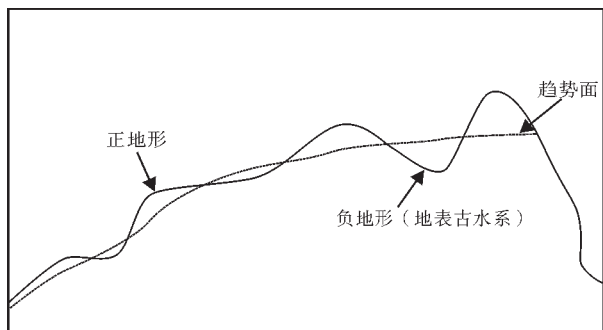
Fig. 2 Residual thickness map of Ma₅¹⁻⁵ + Ma₆ and restored paleogeomorphological map in Fuxian area

3 地球物理古水系识别技术

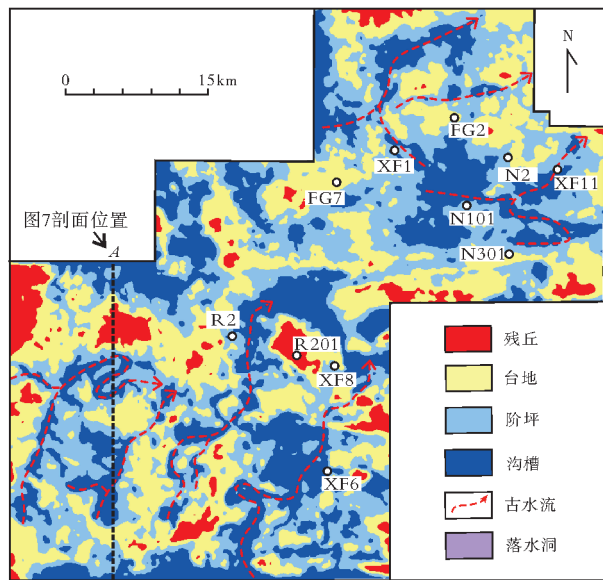
随着学科的相互交叉与不断发展,地球物理技术与现代岩溶理论相结合,地球物理技术在古水系的精细雕刻上发挥出越来越重要的作用,趋势面法、地震分频相干属性分析法、叠加剖面的相干属性分析法及RGB混频分色法等众多技术的应用,极大地提高了岩溶古水系精细刻画准确性。

3.1 趋势面法

趋势面法主要是利用趋势分析方法将地震解释得到的剥蚀面进行处理,形成一个剥蚀面的趋势面,用原层位数据减去趋势面数据得到残差,残差正值区域反映正地形,代表岩溶残丘,残差负值区域反映负地形,即为地表古水系(图3a)。该方法主要突出了不整合面地貌的起伏情况^[12]。



(a) 趋势面原理图(据文献[12])



(b) 趋势面法刻画的古水系分布图

图3 趋势面原理图与富县地区古水系分布图

Fig. 3 Schematic diagram of the trend surface and distribution map of paleodrainage system in Fuxian area

从趋势面法刻画的古水系分布图上可以看出(图3b),古地貌格局同地层残余厚度法恢复的古地貌相似,大型的岩溶残丘(红色部分)主要分布在研究区的中部和西部,其他大量的小型残丘零星分布,形态极不规则。同时从图上可以识别出多条蜿蜒曲折、纵横交错的冲蚀河道(蓝色部分)。综合古地貌和前人的地质认识,分析认为研究区位于大型岩溶斜坡上,古水系结构(沟槽)发育,多条分支河道逐渐汇聚,古水流主体流向为南西—北东向。

3.2 地震分频相干属性分析法

当地层中存在断层、岩性突变或其他特殊地质体时,地震道之间的波形特征会产生变化,从而导致局部的地震道与地震道之间相关性的突变^[12-13]。地震相干数据体通过突出地震信号的差异,使得所描述的地质异常体能够更清晰地显示出来,进而更好地揭示断层、不整合面等地质现象^[14]。连续弱相干的属性特征能够突出古水系与围岩的横向差异,能够更加真实地反映古水系的分布特征。

通过鄂尔多斯盆地富县三维区马家沟组顶面精细相干切片,可以清晰地看到研究区西南部羊泉地区有多条古水系(沟槽)(图4),与周边围岩之间呈不连续、不相干的特征,沟槽边界清晰,明显呈树枝状分叉特征,相干切片平面图上形似分水岭,多条支流交汇于主河道,逐级向北东方向汇聚。研究

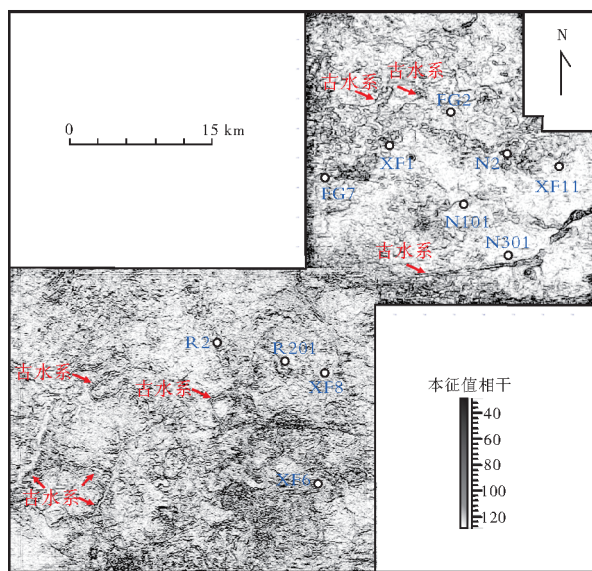


图4 富县地区马家沟组顶面(T9)精细相干切片

Fig. 4 Fine coherent slice of the top surface (T9) of Majiagou Formation in Fuxian area

区东北部牛武地区古水系特征与羊泉地区有较大差异,仅见少数几条清晰河道边界,可能与该区域地下水系较发育有关;该区马家沟组碳酸盐岩主要以石灰岩为主,地下暗河发育区后期多坍塌、充填,一般在相干切片上不能清晰呈现。

3.3 叠加剖面的相干属性分析法

地震波在地层中的传播过程中,在溶洞、断层、特殊地质体等岩性突变处会出现绕射现象,以岩性突变点为中心产生绕射波。根据绕射波的产生原理,充分利用绕射波信息,可根据绕射波的位置和发育情况,结合相干等地震属性,预测岩溶洞穴、沟槽发育位置与发育程度。

从鄂尔多斯盆地富县三维区沿马家沟组顶面的叠加数据相干属性图上可以看到(图5),水平叠加资料对于河道的刻画比较清楚,河道主体相干性较好,没有绕射波。在河道的旁边呈现出一系列绕射波,形成相干低值区。距离河道较远的区域,存在孤立的相干低值区,推测为小型溶洞发育区。另外,断裂附近也是绕射波比较发育的地方。

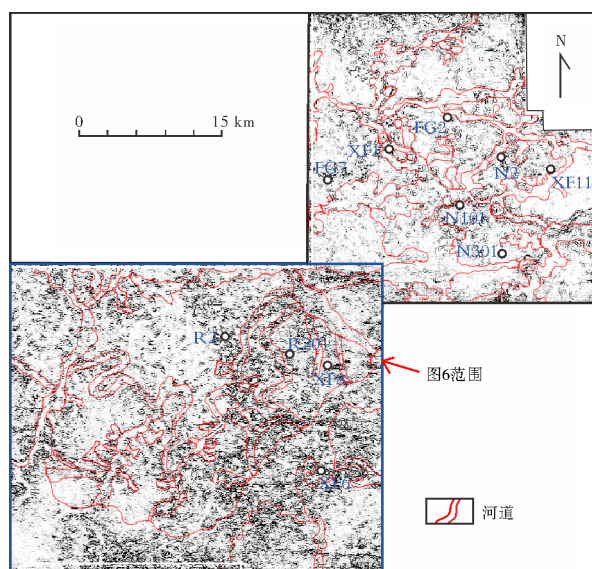


图5 富县地区沿马家沟组顶面叠加数据相干属性图
Fig. 5 Coherence attribute map based on superimposed data along the top surface of Majiagou Formation in Fuxian area

3.4 RGB混频分色技术

RGB混频分色技术是在频谱分解技术的基础上发展起来的^[15-16]。其原理是先通过小波分频处理等方法得到一系列窄频带地震调谐振幅体和对应频段的调谐能量属性体,然后找出对古水系有响应

特征的主频段,围绕该主频段将小波分频可以得到互不重叠的低、中、高频段3类能量属性体,再以RGB(红、绿、蓝三原色)模式混合形成一个具有通频信息的彩色数据体,然后在该数据体上进行沟槽或储层的刻画与分析。这种RGB混合显示方法对于突出各分频属性中能量相近的区域有很好的效果,即突出共性、弱化差异,大大提高了横向分辨能力,具有将许多微小的地质体“放大”的功能,其结果明显优于单个分频能量属性效果^[12]。

本次研究首先选择调谐振幅谱频带不重叠的低、中、高3个分频数据体,主频分辨为15 Hz、30 Hz和50 Hz,然后对窄频数据体分别进行相干属性提取,最后对分频相干体进行RGB融合显示,其中15 Hz的相干体为红色,30 Hz的相干体为绿色,50 Hz的相干体为蓝色。从成果图中可以看出(图6),RGB混频分色技术无论对主河道走向的判断还是细小分支河道的精细雕刻都有了很大的提升。研究区古水系特征十分明显,西南部分布多条南西—北东走向的主河道,同时还发育众多呈树枝状的河道支流,在西北部 and 东南部也发育了数条北西—南东走向的河道,但最终还是汇入南西—北东走向的主河道中。西南部古水系结构连续、复杂,且延伸长,分流河道汇入主河道之间的夹角小于等于90°,主河道两侧分支数量近乎相当,整体结构对称,由西南部岩溶斜坡高部位逐步汇聚流向东北部低部位的特征明显。

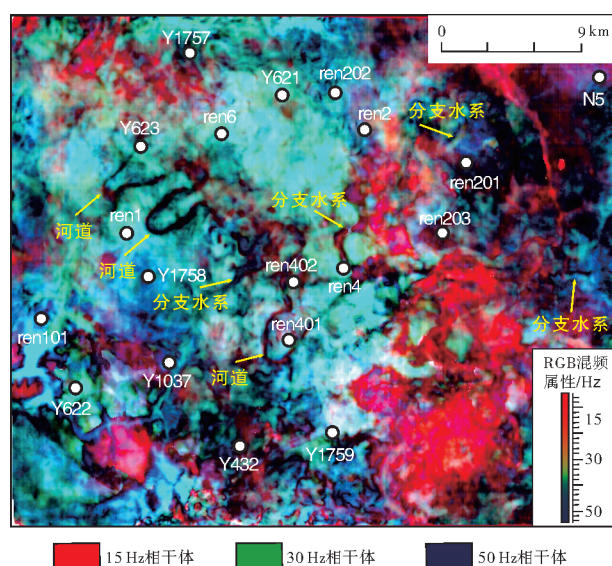


图6 富县地区西南部T9 RGB混频属性图
Fig. 6 RGB frequency mixing attribute map of T9 interface in the southwest of Fuxian area

4 古水系识别效果分析

研究区马家沟组顶主要发育地表及地下2类古水系。地表古水系分布在剥蚀面之上,一般发育于马六段、马五₁亚段,在研究区西南部岩溶作用较强,部分地表水系深切,出露马五₄亚段;地震剖面上,地表古水系具有明显的下拉特征(图7)。地下水系则位于T9以下,主要分布于马五₂—马五₅亚段;地震剖面上,地下水系则呈现弱串珠状特征。古水系的类型不同,其在平面形态、波形、属性上的特征也各不相同,识别方法也有所差异。

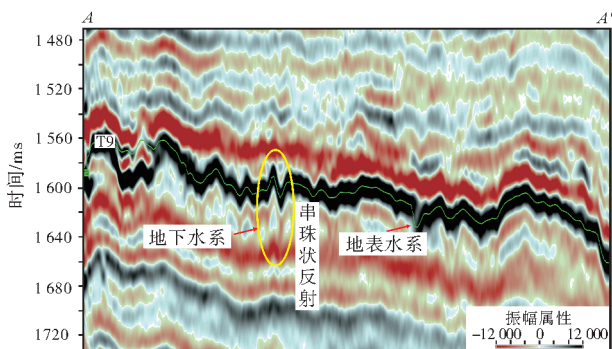


图7 富县地区古水系地震剖面特征
(剖面位置见图3)

Fig. 7 Seismic profile showing paleodrainage system in Fuxian area
(profile location is shown in Fig. 3)

4.1 富县地区地表水系识别效果

应用不同的古水系识别技术,对研究区古地表水系的分布规律和结构特征进行刻画:利用古地貌恢复和趋势面技术所识别的古地表水系在水系区域性划分和空间展布方面基本一致,但对于河道这种微观地貌的刻画精度不够(图2,图3);在相干属性和叠加剖面相干属性图上,对于河道微地貌的识别精度有了很大的提高,可以清晰地看到主干河流边界,但是受到断裂的影响,对于分流河道的刻画较为模糊,仅能看到大致的轮廓(图4,图5);而在RGB混频分色属性图上(主要为研究区西南部古水系特征,东北部因地震资料品质问题未能合成有效的彩色数据体),对于古水系结构的刻画有了更大的提升,对混色体沿不整合面进行瞬时切片,地表水系显示为连续的异常条带。RGB混频分色技术将各种微地貌形态效果放大,对于分支水系的边界刻画更为清晰,可看到形似“分水岭”的地表水系展布(图6),呈曲流河、网状河等特征,支流比较发育。此外,还提取了研究区剥蚀面波峰宽度属性(图8a),显示地表水系存在明显的下切谷(图8b,8c),后来本溪组沉积对其填平补齐,造成剥蚀面在地震上的波峰(T9)宽度变宽(图8a)。

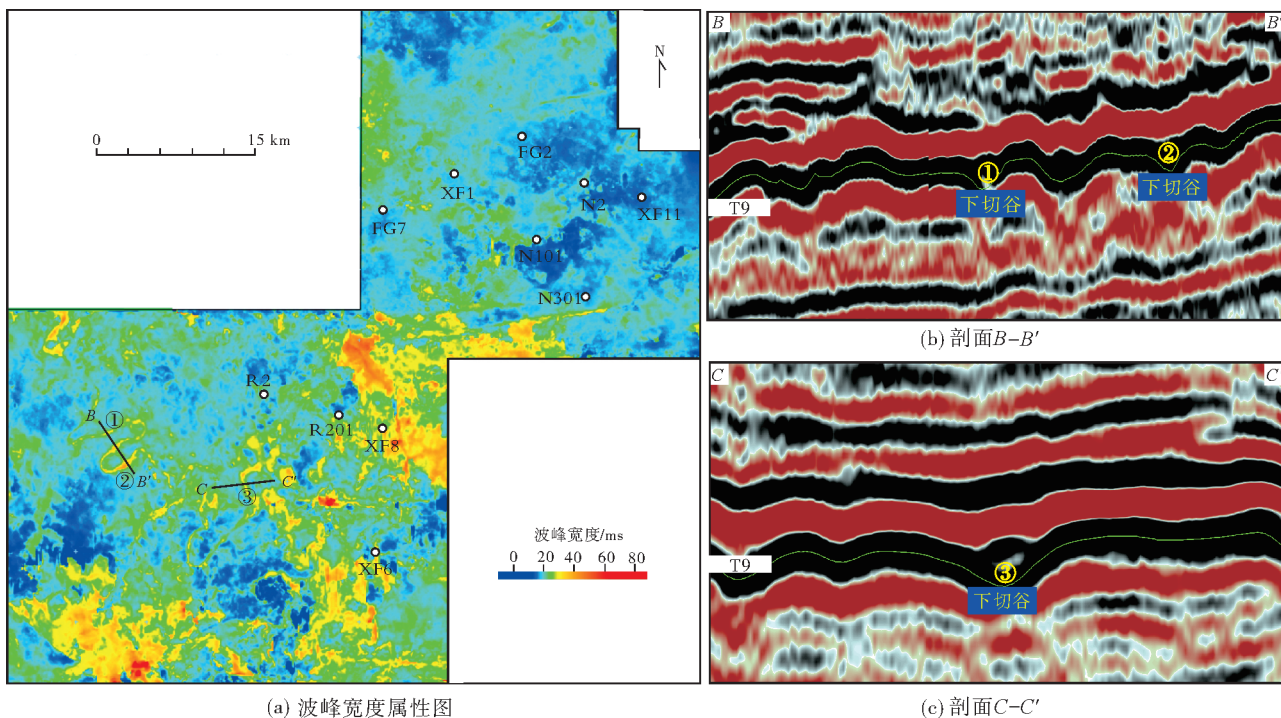


图8 富县地区波峰宽度属性(T9+50 ms)及剖面特征图

Fig. 8 Peak width attribute (T9+50 ms) and profile characteristics in Fuxian area

4.2 富县地区地下水系识别效果

当碳酸盐岩地层中发育地下水系时,其缝洞体系与周边围岩存在较大的波阻抗差异,从而形成强振幅地震反射特征,即振幅的强弱与地下缝洞体系(地下水系)密切相关^[12],这也是平均绝对振幅属性

技术刻画地下水系的原理。平均绝对振幅属性对于规模较大的地下水系识别效果较好(图9a),在图上呈现连续的地下暗河特征,形态平直;但受限于分辨率,对于规模较小的地下水系识别效果较差,在属性图上表现为不连续的点状特征,可能为地下洞穴,也可能为规模较小的分支水系。

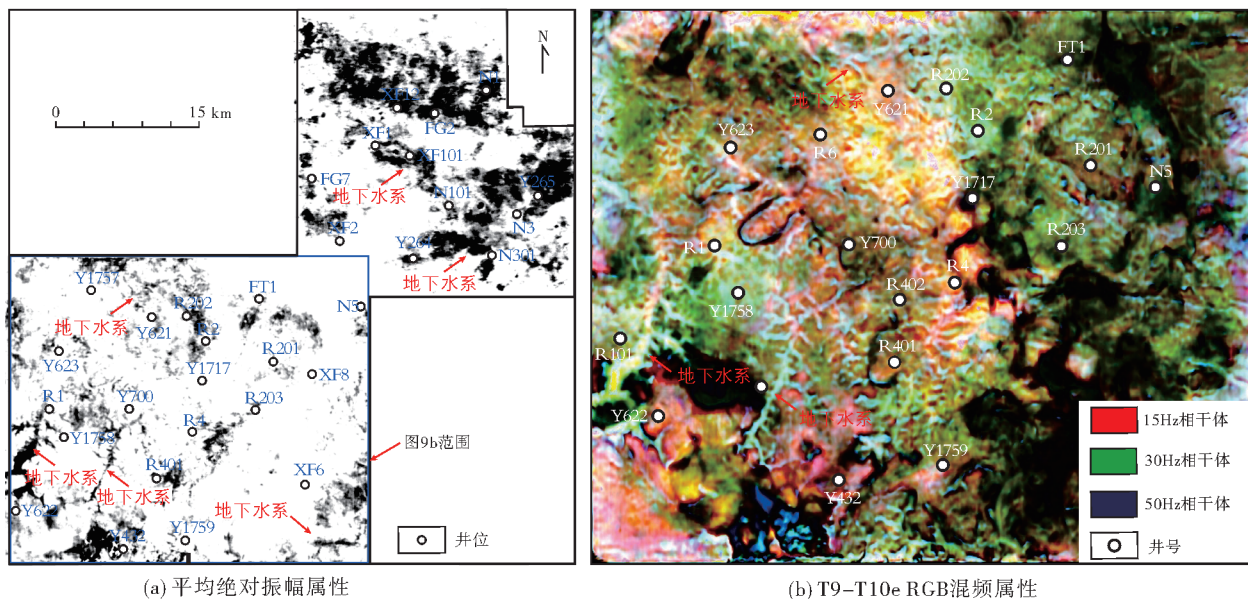


图9 富县地区平均绝对振幅属性与T9-T10e RGB混频属性图

Fig. 9 Average absolute amplitude attribute and T9–T10e RGB frequency mixing attribute in Fuxian area

由于研究区碳酸盐岩遭受多次风化剥蚀,加之后期受地层压力的影响,地下水系及其洞穴大部分垮塌,地下水系附近地层整体下拉,但各地层仍然是平行的,厚度无明显变化,因此在T9波峰宽度属性图上,剥蚀面波峰宽度无明显变化。利用RGB混频分色技术刻画地下水系的方法原理与地表水系相同,只是在提取属性时需要沿不整合面以下定时窗进行切片(图9b),确保其展布和结构显示完整。地下水系表现为连续的亮色条带,平面分布一般与断裂、岩性相关,与地形无关,因此平面形态往往比较平直,支流较少,并且往往伴随落水洞等溶洞发育,与平均绝对振幅属性图上地下水系的分布形态基本一致,整体识别效果较好。

综合以上多种技术手段并结合实钻验证结果对富县三维区古水系进行精细刻画及分类(图10)。三维区内古水系蜿蜒曲折、纵横交错,呈网状分布,将研究区分割成多个岩溶残丘,形态极不规则,受古地貌格局影响,古水系总体走向为南西—北东向。地

表水系主要分布在西南上游部分,其流域面积较大、支流众多,河道具有一定的弯曲度。地下水系主要分布在中下游地区,研究区西南部少量发育,较平直,后期多坍塌,其分布与研究区的断裂展布相关。受走滑应力的影响,富县地区断裂以近东西向为主,并伴随少量与主方向成小角度夹角的次生断裂,水体流经断裂发生选择性溶蚀时会优先顺着断裂发育,优先形成地下水系。

4.3 古水系识别结果验证

地表水系的刻画结果通过马家沟组开壳层位及上覆地层厚度进行验证。古水系的发育不断对河床底部进行侵蚀,导致其残余厚度减薄,地表水系马家沟组的开壳地层更老,后期本溪组直接覆盖在马家沟组之上,地表水系发育处本溪组较周围地层更厚。例如,R6井、XF6井等井钻遇地表水系,马五₁—马五₄亚段已被剥蚀殆尽或仅残余少量马五₄亚段,上覆本溪组厚度可达20~30 m,大于本溪组10~15 m的平均地层厚度。

地下水系刻画的结果主要依据钻井、测井资料进行验证。对研究区钻遇 RGB 混频分色属性图连续异常条带和平均绝对振幅属性图上连续强振幅条带的钻井资料进行收集统计,其中 XF3 井、R2 井、R201 井等多口井钻遇洞穴或发生扩径现象; XF1 井、N101 井等部分井垮塌现象严重,原本位于水平潜流带的地下水系发生溶蚀垮塌(图 11a),充填暗红色角砾白云岩(图 11b),杂乱堆积,形成局部孔洞(图 11c),去白云石化作用强烈。此外,研究区东北部发育多个落水洞(图 10),落水洞在地震剖面上的特征主要表现为上部同相轴呈现出的“V”字形漏斗状特征,通常显示出强烈的串珠状反射(图 11d),多分布于地下主干水系与分支水系交接处或与断裂伴生。落水洞的形成主要是由于侵蚀基准面下降,地下廊道不断加深拓宽,导致伏流的顶板坍塌,形成地下岩溶空间形态^[16]。研究区东北部 N301 井东南侧一处发育落水洞,长轴 314 m,短轴 134 m,呈椭圆状,深约 70 m,总体呈

东—西向,与识别的地下水系走向一致(图 10)。

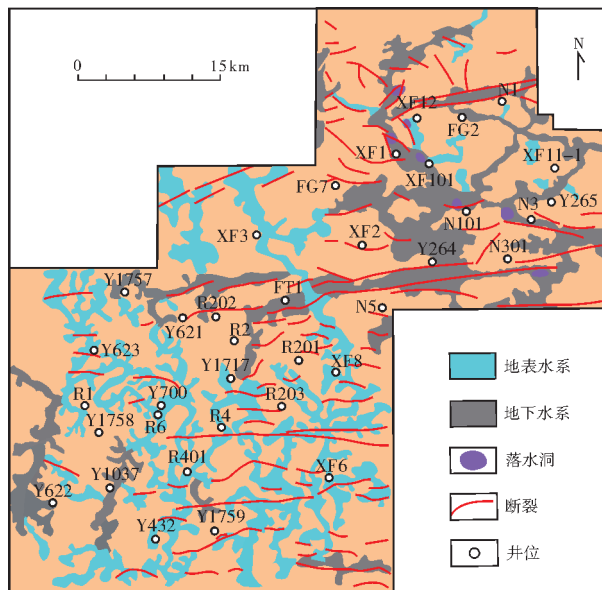
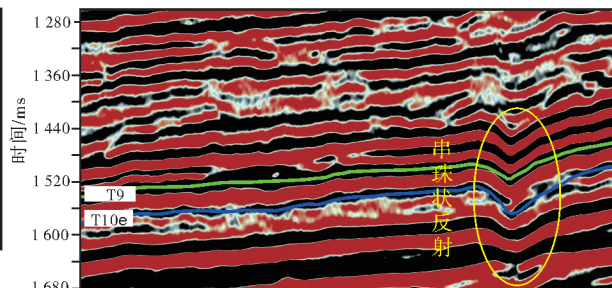


图 10 富县地区连片古水系刻画

Fig. 10 The characterization of contiguous paleodrainage system in Fuxian area



(a) 水平潜流带,磨圆砾岩。R2井 3 041.83 m (b) 暗红色角砾白云岩。R2井 3 023.1 m (c) 杂乱白云岩角砾堆积,大部分发生去白云石化作用。R2井 3 034.5 m



(d) 落水洞地震剖面特征

图 11 鄂尔多斯盆地富县地区古水系识别结果验证

Fig. 11 Verification of paleodrainage system identification results in Fuxian area, Ordos Basin

4.4 古水系发育模式

在古地貌恢复和古水系结构刻画的基础上,建立富县地区古水系的发育模式。在奥陶系沉积时期,沿杭锦旗—乌审旗—庆阳一带发育的大型“L”形中央古隆起带对沉积相的展布、岩溶古地貌以及古水系的发育具有非常重要的控制作用,研究区西南高、东北低的古地貌格局初步形成。加里东旋回晚期受中亚蒙古洋壳和秦祁海洋壳的俯冲挤压影响,盆地整体初步向上抬升,海水退却,奥陶系出露地表遭受大气淡水风化淋滤,该阶段古水系汇水量较小,以地表水系发育为主。随后中亚蒙古洋壳和秦祁海洋壳持续俯冲,构造进一步抬升,侵蚀基准

面大幅度下降,古水系的纵坡降增大,溶蚀作用增强,河流主侵蚀作用转变为下切,上游古水系发育深切曲流,在研究区西南构造高部位发育岩溶峡谷。构造抬升的同时导致潜水位快速下降,加之汇水能力的持续性增强,导致研究区下游东北构造低部位水动力条件不断增强,古水系与地下溶蚀通道相连通,形成大面积的地下水系(伏流、暗河)。伏流强大的汇水能力使其岩溶作用进一步加强,地下廊道不断侵蚀扩张,部分地区因顶部失去支撑而坍塌形成落水洞,故落水洞主要发育在研究区下游,至此上游深切曲流、下游地下伏流的深切曲流—伏流古水系发育模式形成(图 12)。

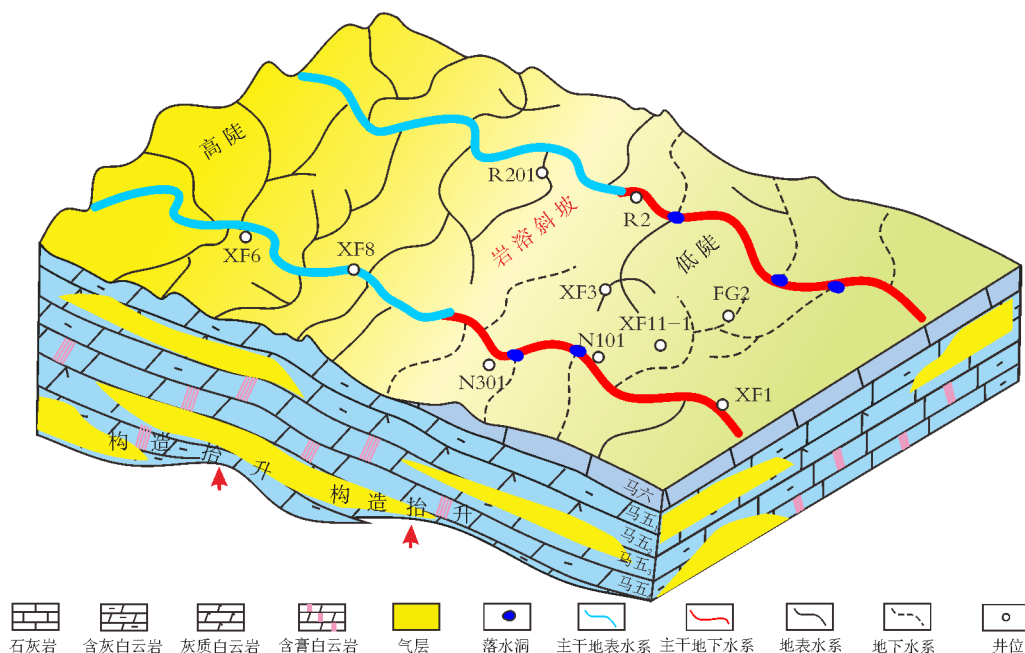


图12 富县地区古水系发育模式

Fig. 12 Development pattern of paleodrainage system in Fuxian area

5 古水系识别的意义

地表古水系在发育的过程中会不断地对侧岸及其河床进行溶蚀,导致河床及两侧发育大量溶蚀孔洞;地下水系不仅可以形成大量溶蚀缝洞,还会形成大型的溶蚀洞穴、地下廊道。但这些储集空间在后期成岩作用、构造运动以及上覆地层巨大的压力等多方面因素的影响下大多发生垮塌充填,原来的孔洞缝大部分被角砾和方解石、白云石以及石英的脉体充填,仅留下少部分未完全充填的残余孔隙^[17]。古水系将研究区古地貌分割形成4个三级古地貌单元:残丘、台地、阶坪、沟槽。不同地貌单元岩溶作用强度和储层发育程度存在较大差异。

岩溶残丘、台地在后期成岩作用以及构造抬升剥蚀的过程中形成了大量的溶蚀孔洞、裂缝和膏模孔,并完好的保存下来,为油气提供了大量的储集空间,而且古水系消亡后沟槽被迅速填平补齐,尤其是富县地区下奥陶统上覆地层为中石炭统本溪组的致密泥岩、碳质泥岩,形成油气天然的封堵“屏障”,对于油气的储存极为有利。如XF11-1井位于残丘上,为局限台地潮坪亚相膏云坪、含膏云坪沉积,与沟槽保持了一定的距离,岩溶作用改造弱,破坏作用较弱,储集空间保存较为完好,为油气大规模运移提供了大量有效储集空间,测井上表现为电

阻率降低、声波时差增大、密度降低、中子孔隙度增大的特征,并获得了高产工业气流。FG7井位于台地古地貌单元,储层岩性为灰黑色含灰白云岩、含膏白云岩,以含膏云坪沉积为主,岩溶改造弱,多发育膏模孔,在储层顶部岩性突变面见低角度开启缝,储层物性较好,同时与断裂保持了适当的距离,为上部油气的运移提供了有利通道,而且马家沟组上部覆盖了本溪组13.3 m厚的铝土岩,储盖组合条件较为优越,最终获得工业气流。

阶坪地貌单元储集空间同样被大量充填,仅残留少部分未完全充填的残余空隙,且连通性较差,加之构造抬升导致马家沟组上部地层被剥蚀殆尽,所以整体储集效果远不如残丘、台地类古地貌单元。FG2井等位于阶坪古地貌单元的井钻遇气层层位较少,裂缝与微裂缝较完全充填、膏模孔不完全充填,破坏了储集空间,储层较为致密,试气效果较差。

沟槽地貌单元地层几乎剥蚀殆尽,且剩余地层垮塌充填严重,储集空间破坏程度高,储集效果最差。如XF1井、N101井、XF6井以及XF8井,由于先前资料品质以及对研究区地质认识不足等原因,直接钻遇地表或地下水系(古地貌的沟槽),马家沟组大部分被剥蚀,储集空间遭到严重破坏,均未获得良好的试气显示。

综合古水系发育模式与实钻井分析,并结合古地貌优选出研究区优势储层范围位于岩溶残丘和台地,阶坪次之,沟槽最不发育(图13)。

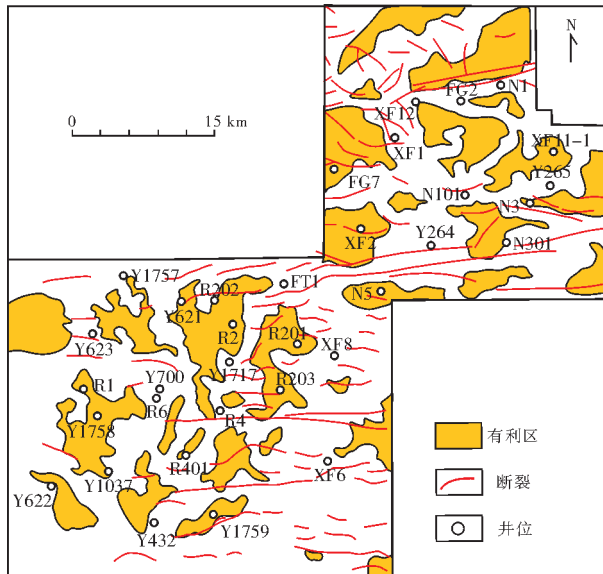


图13 富县地区马家沟组岩溶有利储层分布图

Fig. 13 Distribution of favorable karst reservoir of Majiagou Formation in Fuxian area.

6 结论

(1)应用残余地层厚度法对鄂尔多斯盆地富县地区马家沟组的岩溶古地貌进行恢复,可将研究区划分为残丘、台地、阶坪、沟槽4个三级地貌单元。

(2)研究区古水系结构上游(西南地区)主要是地表水系,以深切曲流为主,发育岩溶峡谷;下游(东北地区)多为地下水系,发育伏流与暗河(后期多垮塌),水动力更强,部分地区顶部坍塌见落水洞,古水系发育模式为深切曲流-伏流型。

(3)综合分析认为富县地区奥陶系马家沟组马五段储层形成条件优越,残丘、台地等岩溶古地貌单元的储集空间保存完整,是优势储层发育的有利区带;阶坪古地貌单元的地层剥蚀严重,有一定的储集空间,储层发育条件次之;沟槽古地貌单元岩溶作用强度大,多垮塌被充填,难以形成有效的储集空间。

参考文献

- [1] 李林峰. 鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系储层形成机理及分布规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
LI Linfeng. Forming mechanism and distribution of ordovician reservoirs in Fuxian area, Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [2] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 106-112.
HOU Fanghao, FANG Shaoxian, DONG Zhaoxiong, et al. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2003, 21(1): 106-112.
- [3] 孙肇才, 谢秋元. 叠合盆地的发展特征及其含油气性: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油实验地质, 1980(1): 13-21.
SUN Zhaocai, XIE Qiuyuan. Development characteristics of superimposed basins and their oil-bearing properties: a case study of the Ordos Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 1980(1): 13-21.
- [4] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 17-24.
YANG Hua, XI Shengli, WEI Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos Basin[J]. China petroleum exploration, 2006, 11(1): 17-24.
- [5] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [6] 于洲, 丁振纯, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积相演化模式研究[J]. 海相油气地质, 2017, 22(3): 12-22.
YU Zhou, DING Zhenchun, WU Dongxu, et al. Sedimentary facies evolution model of Ordovician Majiagou Formation, central-eastern Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2017, 22(3): 12-22.
- [7] 郭忠铭, 张军, 于忠平. 鄂尔多斯地块油区构造演化特征[J]. 石油勘探与开发, 1994(2): 22-29, 120.
GUO Zhongming, ZHANG Jun, YU Zhongping. The evolutionary characteristics of structure of the oil and gas bearing areas in Ordos massif[J]. Petroleum exploration and development, 1994(2): 22-29, 120.
- [8] 周树勋, 马振芳. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系不整合面成藏组合及其分布规律[J]. 石油勘探与开发, 1998(5): 30-33, 4, 10.
ZHOU Shuxun, MA Zhenfang. Study on the play and the distribution of Ordovician unconformity in central east Ordos Basin[J]. Petroleum exploration and development, 1998(5): 30-33, 4, 10.
- [9] 邹新宁, 孙卫, 张盟勃, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系侵蚀沟谷及顶面形态识别[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 610-614.
ZOU Xinning, SUN Wei, ZHANG Mengbo, et al. Recognition of eroded channel-vale and top fluctuant configuration for Ordovician in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (natural science edition), 2006, 36(4): 610-614.
- [10] 王禹诺, 任军峰, 杨文敬, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组天然气成藏特征及勘探潜力[J]. 海相油气地质, 2015, 20(4): 29-37.

- WANG Yunuo, REN Junfeng, YANG Wenjing, et al. Gas accumulation characteristics and potential of Ordovician Majiagou reservoirs in the center-east of Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2015, 20(4): 29–37.
- [11] 马宁, 丁晓琪, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地富县中奥陶统风化壳古地貌特征[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(2): 7–14.
- MA Ning, DING Xiaoqi, ZHANG Wei, et al. Paleogeomorphic features of Middle Ordovician weathering crust, Fuxian area, Ordos Basin[J]. Natural gas exploration and development, 2022, 45(2): 7–14.
- [12] 李源, 蔡忠贤, 张恒, 等. 塔河油田海西早期岩溶古水系识别方法及其特征[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 184–191.
- LI Yuan, CAI Zhongxian, ZHANG Heng, et al. Recognition methods and characteristics of karst drainage system in Hercynian, Tahe Oilfield[J]. Bulletin of geological science and technology, 2016, 35(4): 184–191.
- [13] 刘伟方, 郑多明, 王洪求, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山古水系研究方法及其意义[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 75–81.
- LIU Weifang, ZHENG Duoming, WANG Hongqiu, et al. Research methods and the significance of palaeodrainage patterns in Ordovician buried-hill carbonate reservoirs, Tarim Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2013, 18(4): 75–81.
- [14] BAHORICH M, FARMER S. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: the coherence cube[J]. The leading edge, 1995, 14(10): 1053–1058.
- [15] THEOPHANIS S, QUEEN J. Color display of the localized spectrum[J]. Geophysics, 2000, 65(4): 1330–1340.
- [16] 曹鉴华. RGB混频显示技术及其在河道识别中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(5): 355–358.
- CAO Jianhua. RGB color blending and its application in channel recognition[J]. Progress in exploration geophysics, 2010, 33(5): 355–358.
- [17] 张长建, 吕艳萍, 马海陇, 等. 塔河油田岩溶峡谷区伏流坍塌型古暗河缝洞系统[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(1): 9–17.
- ZHANG Changjian, LV Yanping, MA Hailong, et al. Fracture-cave system in collapsed underground paleo-river with subterranean flow in karst canyon area, Tahe Oilfield[J]. Xinjiang petroleum geology, 2023, 44(1): 9–17.

编辑：韦东晓

Identification of paleodrainage systems and its significance of the Ordovician Majiagou Formation in Fuxian area, Ordos Basin

GAO Hui, HUANG Zhongqun, MA Baizheng

Exploration and Development Research Institute, North China Oil & Gas Branch of Sinopec

Abstract: The research of paleodrainage system is of great significance for the exploration and development of carbonate karst reservoirs. Based on restoration of paleogeomorphology, this paper utilizes the trend surface method, seismic frequency division coherence attribute analysis, fine coherence attribute analysis of superimposed seismic profiles, and RGB frequency division color mixing extracted along the weathered crust layer to delicately characterize the paleodrainage system of Majiagou Formation on the top of Middle Ordovician in the Fuxian area. The results show that: (1) The research area is located in the early Hercynian karstification zone, with a overall characteristic of being high in the southwest and low in the north and east, and the paleogeomorphology can be divided into four third-class units: residual hill, platform, terrace and trench. (2) Two types of palaeodrainage systems, surface and subsurface, are developed in the study area. The surface palaeodrainage system is developed in the southwest high part (southwest region), which is nearly symmetrical dendritic and dominated by deep-cut meandering currents. And the subsurface palaeodrainage system is developed in the northeast structurally low part (northeast region), which is dominated by dark rivers and subterranean flows, with stronger karstification and more collapses, and sinkholes. The surface and subsurface jointly constitute a deep-cut meander-subterranean flow development model. (3) Karst remnant mounds and platforms are favorable areas for the development of high-quality reservoirs. In this study, a variety of methods are used to describe the paleodrainage system, overcoming the limitations of single technology. The combination of multiple morphological features enhances the reliability of identifying surface and subsurface palaeodrainage systems, determines the development locations of dominant reservoirs, and provides important reference significance for the exploration and development of the Lower Palaeozoic in the study area.

Key words: paleogeomorphology; paleodrainage system; karst reservoirs; Majiagou Formation; Ordos Basin

GAO Hui, First author; MSc, Associate Researcher, mainly engaged in research on karst reservoir. Add: No. 199 Longhai West Rd., Zhongyuan District, Zhengzhou, Henan 450006, China. E-mail: gaoh.hbsj@sinopec.com