

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

刘伟方¹, 郑多明², 王洪求¹, 董瑞霞², 张喜梅¹, 苗青²

(1 中国石油勘探开发研究院西北分院; 2 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院)

摘 要 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山主要存在地表及地下两种古水系。两类古水系与潜山碳酸盐岩岩溶型洞缝储层的发育及分布有着密切关系。地下水系控制着大型溶洞的分布,对后期溶洞垮塌、形成顶部大型垮塌裂缝具有重要作用;地表水系在潜山高部位以侵蚀作用为主,在潜山低部位以侧向、纵向溶蚀作用为主,但都能在河床底部及两侧形成较深的溶蚀,并且在成岩作用过程中,由于后期充填物的差异性压实而形成裂缝。同时这两类古水系在演化过程中,都对潜山裂缝起着扩溶作用,以形成更大的岩溶洞缝体系。在潜山区古水系研究过程中采用了古地貌恢复法、地震属性法、频谱分解法、分方位叠前裂缝预测法等方法。

关键词 塔里木盆地; 潜山; 岩溶储层; 裂缝型储层; 古水系; 识别方法

中图分类号: TE111.2; TE122.3

文献标识码: A

塔里木盆地中—下奥陶统碳酸盐岩在形成储层的过程中,主要受两期构造运动的影响较大。一是受加里东期构造运动影响,整体抬升并长期接受剥蚀,形成广泛分布的典型岩溶地貌,古水系发育;二是受海西期巨型走滑构造运动影响,裂缝发育。多期构造运动与多期岩溶作用,以及后期成岩作用的叠加,导致奥陶系碳酸盐岩的岩溶缝洞系统非常发育且复杂。

塔里木盆地奥陶系的古水系主要发育于中—下奥陶统一间房组及鹰山组之中,在这些沉积的地层中,塔中地区地表水系特征明显,但分布范围相对局限,塔北地区则在轮古及哈拉哈塘地区分布较广,水系大多呈树枝状分布,逐级向南汇聚。对于碳酸盐岩地层而言,地表水系能够引起河床底部及侧岸岩溶,形成储集空间;而地下水系虽然它们受后期成岩作用的影响而不易保存完整,但它们仍然是碳酸盐岩地层中极为有效的储集空间。因此,研究古水系对预测与古岩溶有关的洞缝储集空间的分布规律具有重要的意义。

1 古水系识别方法

古水系包括地表水系及地下水系。古水系类型不同,其识别方法也有所差异。

1.1 地表水系的识别

塔里木奥陶系碳酸盐岩潜山的地表水系特征明显,利用古地貌恢复技术、常规地震技术、相干体技术以及频谱分解等技术可以很好地来识别。

1.1.1 古地貌恢复技术

目前,塔里木奥陶系潜山古地貌的恢复技术主要采用残余厚度法或印模法。在轮古研究区,由于潜山暴露时间久、上覆地层厚度变化复杂,而潜山面以下却存在相对稳定的沉积界面,因此选择残余厚度法进行古地貌恢复。

从轮古研究区古地貌恢复结果(图1)可以看出,该区潜山顶面呈现北高南低格局,喀斯特地貌非常发育,形态极不规则,岩溶残丘群体分布,以大量错

收稿日期: 2013-04-16; 改回日期: 2013-08-28

基金项目: 本文受国家“十二五”规划大型油气田及煤层气开发科技重大专项“海相碳酸盐岩储层地震描述与油气藏有效预测技术研究”课题(编号: 2011ZX05004-003)资助

刘伟方: 1969年生,博士,高级工程师。1993年毕业于长春地质学院地质矿产普查专业;1996年毕业于中国科学院兰州地质研究所沉积学专业,获硕士学位;2006年获中国地质大学(北京)能源学院矿产普查与勘探专业博士学位。长期从事构造、储层及地震属性方面的研究工作。通讯地址: 730020 甘肃省兰州市城关区雁儿湾路535号;电话: (0931)8686183

综复杂的峰丛、冲蚀沟为特点。区内西北部地势最高,岩溶现象最为发育,峰丛分布杂乱无序,冲蚀沟蜿蜒曲折,纵横交错,但总体走向呈北西—南东向。

从岩溶古地理的角度分析,该区属于岩溶斜坡,坡上地表水系发育,整体由北向南流,并呈树枝状分布,各分支河道向南逐渐汇聚。

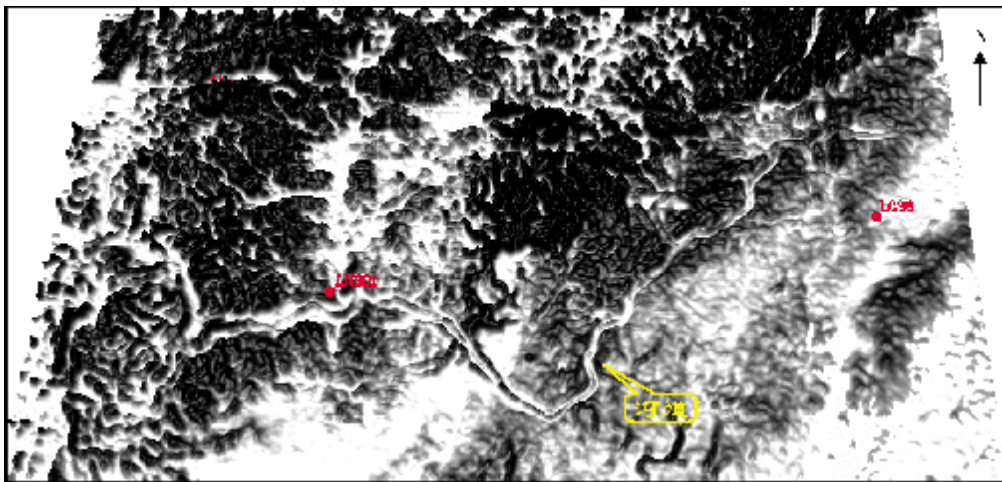


图1 塔里木盆地轮古研究区古地貌恢复结果

灰度代表地面高程。颜色由白到黑,示地貌高差由小到大

1.1.2 常规地震技术

常规地震技术也就是所谓的“相面法”,通过相对保真的常规地震剖面和水平切片上振幅与相位的变化特征来识别河道,这是常用且有效的方法之一。利用三维地震资料,可以识别出有一定规模的河道。

塔中研究区地震剖面上的河道横切面一般表现为一组强振幅同相轴,相邻剖面均有与此类似现象。从单一剖面看,河道反射特征与塔里木盆地奥陶系所谓的“串珠”反射特征类似,不同的是,“串珠”反射在地震切片上的分布呈现相对孤立的特征,而河道则呈现连续、弯曲、宽窄不一、延伸很大的特征(图2)。“相面法”技术用于河道识别只能是初步的、定性的,无法准确预测河道的厚度,同时由于地震资料的分辨率比较低,较小规模的河道也无法分辨。

1.1.3 相干体技术

相干体分析技术是20世纪90年代中期发展起来的一项三维地震解释技术。当存在断层、地层岩性突变、特殊地质体时,地震道之间的波形特征会发生变化,进而导致局部的道与道之间相关性的突变。地震相干数据体^[1]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楚地显示,进而能够更好地揭示断层、岩性体边缘、不整合等地质现象。在古

水系的研究中,利用相干体技术能够突出地表水系与围岩的横向差异及不相干的地震地质特征,故能够更加真实地反映地表水系的分布。

通过哈拉哈塘研究区潜山顶面沿层相干切片,可以很明显地看到古地表水系与围岩之间的不连续、不相干特征,其地表水系特征明显,并逐级向南汇聚(图3)。

1.1.4 频谱分解技术与混频技术

(1) 频谱分解技术

常规地震技术及相干体技术等对古水系分布均有较好的反映,尤其是相干体技术能够将河道边界刻画得非常清楚,但它只能定性地描述古水系的展布特征。利用频谱分解技术,不但可将河道边界刻画清楚,而且利用调谐频率,还能够半定量地描述河道沉积体的厚度。

频谱分解技术,通过时—频变换获得有限带宽地震子波的各种频率分量特征,从频率域出发对薄层时间厚度和地质体的非连续性进行检测,可以突破地震分辨率小于 $1/4$ 波长的限制,对于薄层厚度和地质体的非连续性成像方面十分有效^[2]。

在哈拉哈塘研究区,通过短时窗傅氏变换对相对保真的地震数据进行频谱分解处理,通过分频扫描,认为在地震资料主频20 Hz附近的能量属性上

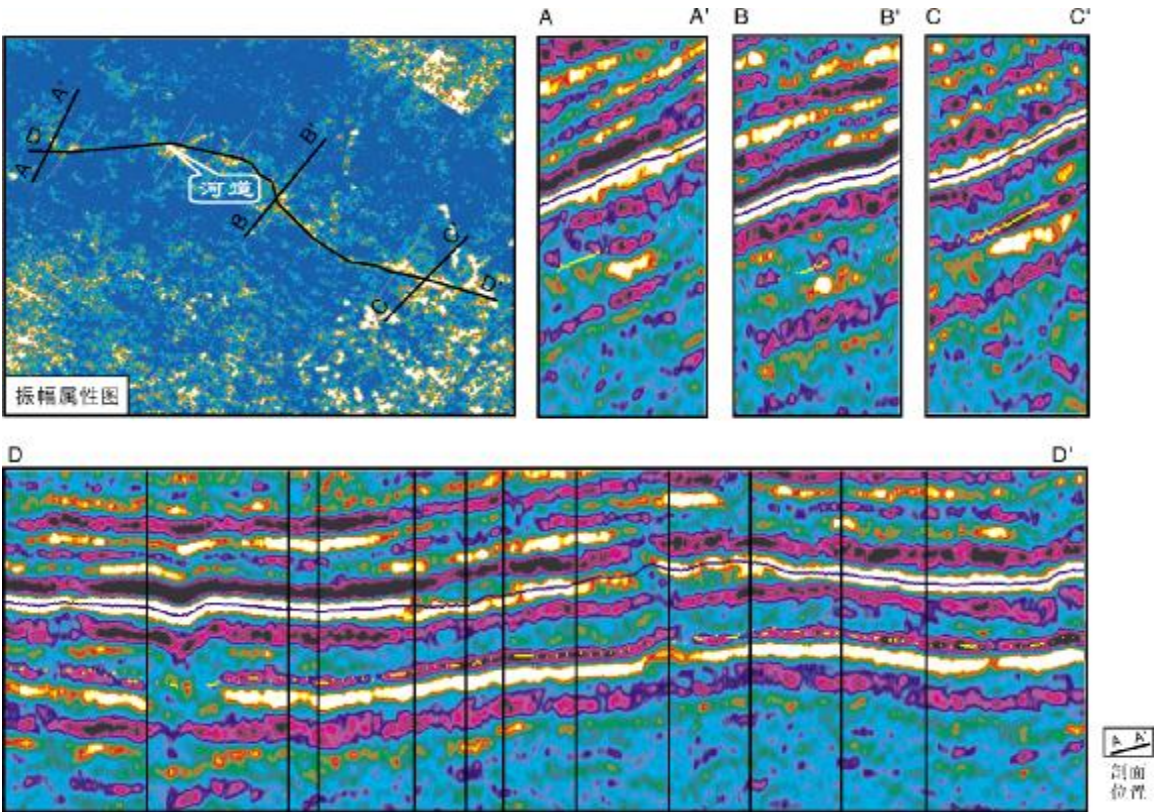


图2 塔里木盆地塔中研究区地表水系沿层地震属性平面特征及地震剖面特征

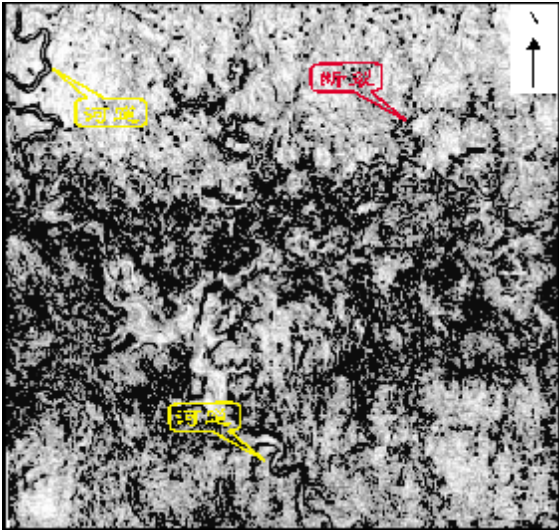


图3 塔里木盆地哈拉哈塘研究区潜山顶面沿层相干切片

对河道有明显的响应。从图 4 中可以看出,不同中心频率的分频切片结果均比全频段振幅属性切片能更好地刻画出古水系特征,但它们之间也存在着差异,这主要是由于特定频率的调谐数据体所反映的古水

系河道厚度不同引起的。

(2)混频技术

经过频谱响应分析,较低分频结果与较厚的沉积体对应,较高分频结果与较薄的沉积体对应。频谱分解技术通常是在单一频率基础上应用不同频段来识别特定厚度的岩体,而地下地质体的厚度一般存在较大变化,需要多张分频属性图来反映地质体的空间分布特征。对于古地表水系而言,河道沉积厚度是变化的,单一频率无法精确反映这种厚度的变化。因此,同一河道其频谱响应是多频组合的。而利用混频技术,综合低、中、高频的多频信息来反映沉积厚度,其有效信息较单一频率的分频结果更丰富,它对古水系特征的描述也更可靠。

混频技术利用的是RGB(Red-Green-Blue)三原色原理,它是在频谱分解技术基础上发展起来的^[3-4]。RGB混频技术将互不重叠的低频段、中频段、高频段能量属性的分频结果以RGB模式混合起来显示,形成一个具有宽频信息的彩色数据体,然后在该数据体上进行地质体的刻画与分析。

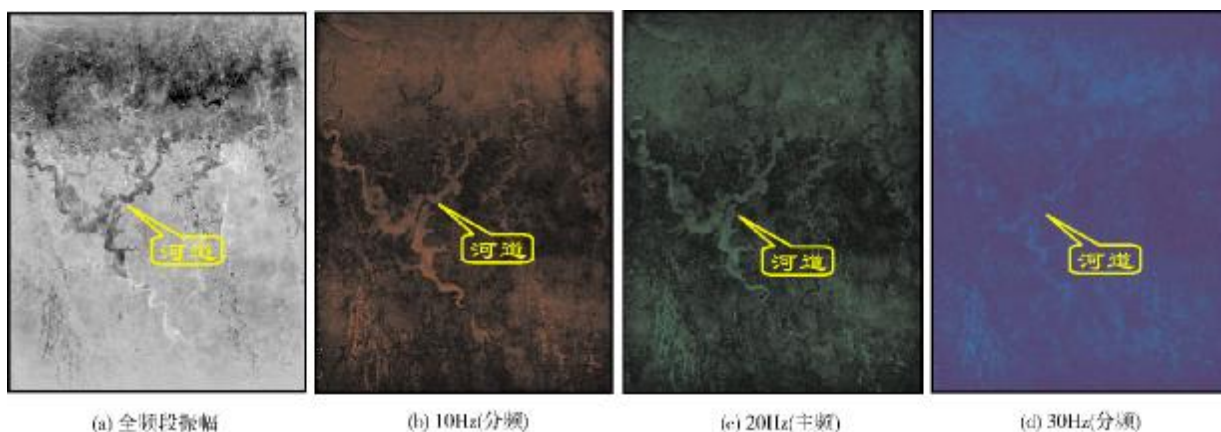


图 4 塔里木盆地哈拉哈塘研究区沿潜山顶面的全频段振幅属性切片及不同分频能量属性切片

在哈拉哈塘研究区地表水系刻画中,RGB混频数据体上地表水系展布特征非常清晰(图5)。与图4相比,混频结果对于古水系的分辨能力有了很大的改善。从图5可看出:研究区的地表水系特征非常明显:水系连续、形状弯曲、宽窄不一、延伸很大,并由北部潜山高部位逐级向南汇聚;研究区西部有一本区最大的分支水系,它与西部的断裂有密切关系;中部和东部的分支水系规模相对较小,它们同样与该区北东—南西走向及北西—南东走向的“X”形断裂有关。预测哈拉哈塘研究区地表古水系的长为9.21~51.04 km,宽为32~105 m,水道沉积厚度为43~125 m。

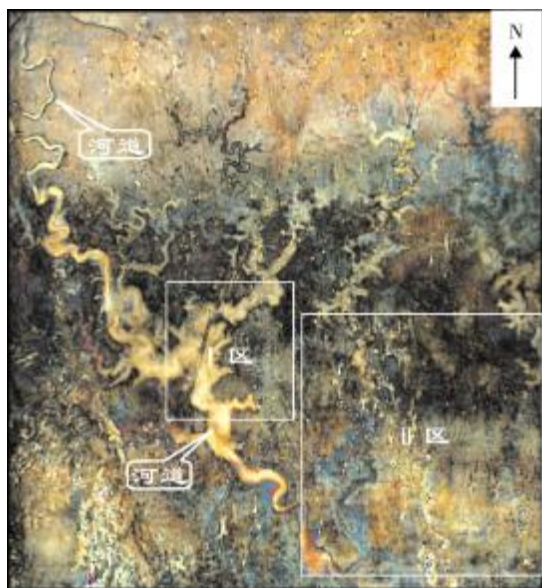


图 5 塔里木盆地哈拉哈塘研究区 RGB 混合数据体上地表水系展布特征

图中方框区域对应图 6a 和 6b

1.2 地下水系的识别

通常,有碳酸盐岩出露的地方就可能存在地下水系,而且地下水系的规模巨大。事实上,地下水系是从地下纵横交织、错综复杂的结构裂隙及被溶蚀的岩石缝、隙、孔、管发展而来的,这些裂隙和溶蚀的孔、管在地下水的作用下不断扩大,不断加长,互相连通,最终构成了一个巨大而无规则可循的地下岩石管网系统^[5]。

对于塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山而言,它们受加里东期运动的影响而整体抬升,并接受长期风化与剥蚀,且形成了规模巨大的地下水体系。但由于地质环境的变迁,地下水流或者迁入更深的岩层,或者改道,或者发生充填,而且受后期成岩作用、构造活动及上覆地层压实等因素的影响,水系保存极不完整。所以古地下水系在现今的地震资料中很难识别与追踪,它们只能在地质成因指导下,利用地震技术来寻找其残留特征。

图 6 为图 5 中两块不同区域的放大图,并改变了其亮度及对比度。从图 6a 中可以看出,位于哈拉哈塘研究区中部的地表水系汇聚处,存在一个明显的相对地表水系的较低分频能量异常条带,该条带连续、弯曲,类似河道特征,但延伸极为有限(仅 970 m),可能是古地下水系的残余部分。图 6b 位于哈拉哈塘研究区的东南部,存在相对地表水系的低分频能量异常区,该区分布着数条方向各异、形状弯曲、较连续的条带异常,并与其北部地表水系呈不明显衔接。

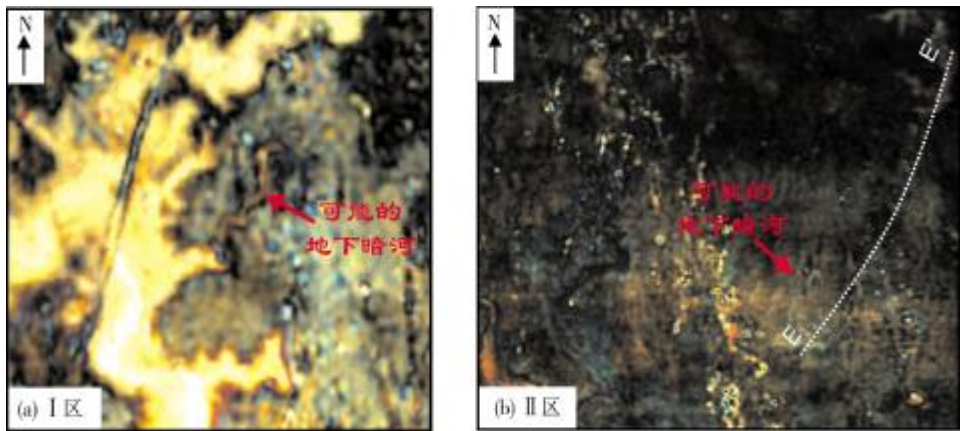


图6 塔里木盆地哈拉哈塘研究区可能的古地下水系特征
(a)和(b)图的位置见图5

从图5看,哈拉哈塘研究区潜山地表水系发育,但东西有明显差异,中西部地表水系特征明显,而东部地表水系分布范围相对局限,向南延伸短,并快速消失。造成上述分布特征的原因,一是与西部大断裂发育有关,二是东部地表水系向南延伸的过程中,可能转为地下水系,所以形成了图6b的分频异常特征。

地震分方位叠前裂缝预测法也是一种预测水系

的有效方法。图7是用该方法切过哈拉哈塘研究区东部地表水系与南部可能的地下水系的一条任意线地震剖面。从剖面上看,两类水系有较大的差异:一是地表水系位于潜山面,而地下水系位于潜山面以下;二是地表水系分布区的地震响应特征呈现同相连续、振幅强度稳定、地层成层性好,而地下水系发育区的地震波组杂乱,振幅能量强弱变化很大,这与复杂的地下水系及复杂的后期改造有密切关系。

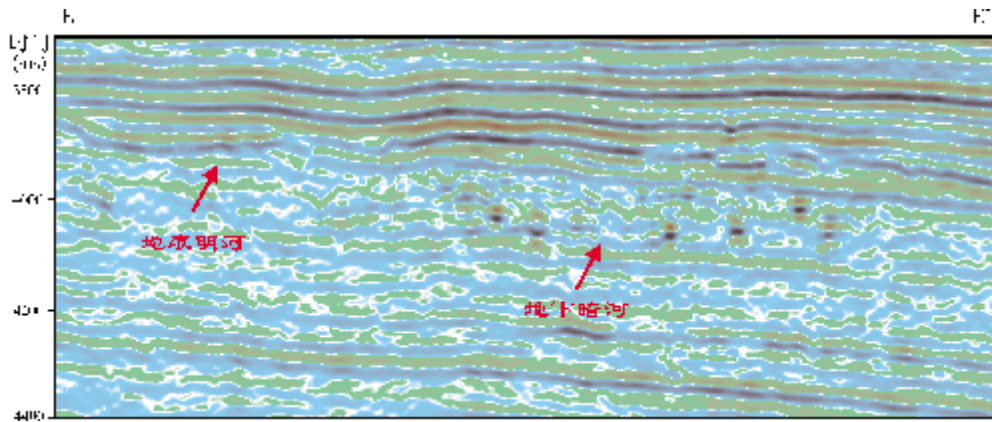


图7 塔里木盆地切过哈拉哈塘研究区北部地表和地下水系的地震剖面
E—E'剖面位置见图6b

2 古水系识别的意义

在现代岩溶区,地下水系复杂多变,宽窄差距极大,且有些河段只有干涸的地下河道,或被大量地表物质充填,导致部分河道完全封堵。虽然地下水系难以追踪与测量,但可以肯定,地下水系的岩溶洞穴具

有极大的空间。对于地表水系,它能够形成河床下及河床两侧岩溶区,而且纵向上河床岩溶发育可以划分两个岩溶带,即上部的孔洞、洞穴带(孔穴带)及下部的孔隙带。总的趋势是,随着深度的增加,岩溶发育程度逐渐减弱,上部充填程度较下部严重。河床下发育的岩溶,受河流控制,它与所处的地貌条件密切相关:

平原地区与丘陵地区,其深度较浅,孔穴带下限的深度在20m左右;岩溶山地的孔穴带下限深度达80~100m左右,也就是说河流上游的岩溶发育深度一般大于河流下游的岩溶深度^[6]。根据上述的现代岩溶考察,说明地表水系与地下水系都能形成有效的岩溶空间。

对于塔里木盆地中—下奥陶统潜山而言,古水系对形成洞缝型储层起到了非常有效的作用。古地下水系由于埋藏深、年代久,以及受后期成岩作用、构造活动及上覆地层压实等因素的影响,保存极不完整,但残留部分仍是现今最为有利的储层类型之一,尤其是洞穴在上覆巨厚地层的压力下造成顶板垮塌,可形成很大的裂缝区域^[7],但这类垮塌缝在地

震资料上一般很难识别,故研究古地下水系的分布规律对寻找垮塌缝的分布具有一定的指导意义。

古地表水系从出现到消亡的过程中,一是对河床底部和两侧都产生溶蚀,形成沿古水系分布的溶蚀孔洞;二是可能形成差异压实裂缝。在塔里木的盆地沉积演化中,古水系在消亡后,河道填平补齐的沉积及其上覆地层均为碳酸盐岩,这对于古地表水系而言,两侧河床的碳酸盐岩成岩早、硬度大,而河道沉积则相对成岩晚、硬度小,上覆的上奥陶统碳酸盐岩在巨厚地层压力下,可能由于差异性压实作用,形成沿古水系分布的裂缝(图8),并呈现古河道相对较宽且裂缝相对发育的特征。

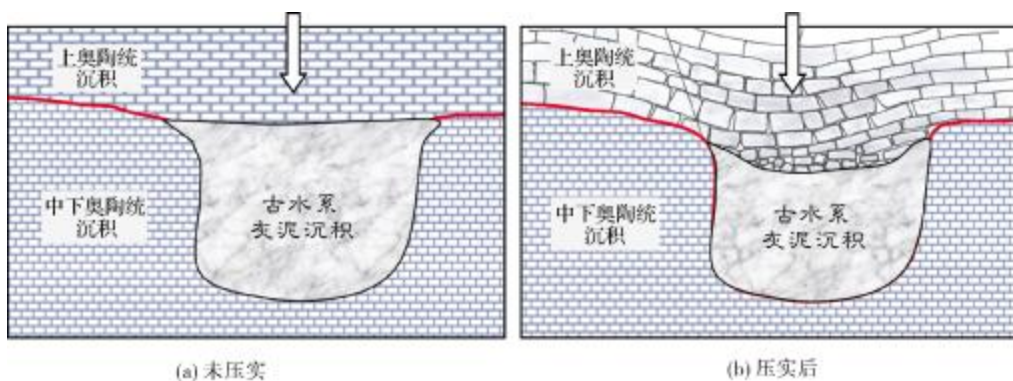


图8 古地表水系差异性压实裂缝形成示意图

目前,对裂缝型储层主要是根据地震散射理论来进行预测,即利用纵波垂直于裂缝带传播会有明显的旅行时延迟和衰减以及频率变低等现象,建立方位地震数据体、频率属性数据体等,并综合描述裂缝型储集层的发育程度^[8]。从哈拉哈塘研究区潜山顶面裂缝密度预测结果(图9)可以看出,在研究区西部发育一个整体呈现北西—南东向的裂缝条带,该条带与图5中的西部古地表水系位置相近,而且在古水系较宽的位置,裂缝也最为发育,从而证明了差异性压实裂缝存在的可能。

3 结 论

(1)古地貌恢复、常规地震剖面和水平切片、相干切片及混频技术,可以较准确识别古地表水系的分布范围及估算出古水系沉积厚度;而混频技术能够有效改善单一频率分频成果的分辨效果,它在识别古地下水系时更为有效。

(2)塔里木盆地奥陶系潜山区的古水系有助于

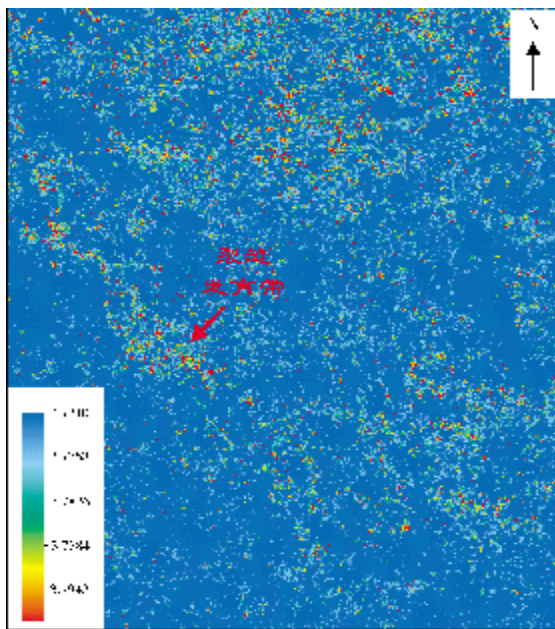


图9 塔里木盆地哈拉哈塘研究区潜山顶面裂缝密度预测结果
红色代表裂缝最为发育的部位

形成多种类型的岩溶洞缝储层: 古地下水系的岩溶洞穴及洞穴垮塌裂缝, 古地表水系的河床两侧及河床底部的溶蚀孔洞与裂缝。古地表水系填平补齐后的差异性压实裂缝虽然利用分方位裂缝预测技术可检测到异常, 但目前还缺乏实际钻井或野外露头的佐证。

(3) 为取得较好地质效果, 在进行古水系刻画及相关储层的有效性分析时, 应采用相对保真处理的地震数据体。

参考文献

[1] Bahorich M, Farmer S. 3-D Seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cub[J].The Leading Edge, 1995, 14(10):1053-1058.
[2] Partyka G A, Gridley J M, Lopez J. Interpretational applica-

tion of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge, 1999, 18(3):353-360.
[3] Theophanis S, Queen J. Color display of the localized spectrum[J]. Geophysics, 2000, 65(4):1330-1340
[4] 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.
[5] 庾莉萍. 著名的地下暗河及暗河成因[J]. 科学中国, 2007, (10):25-27.
[6] 中国科学院地质研究所岩溶研究组.中国岩溶研究[M]. 北京:科学出版社,1987.
[7] Robertson H C. Modern cave systems as analogs for paleokarst reservoirs[C]//碳酸盐岩缝洞型油藏勘探开发技术国际研讨会, 2004.
[8] Subhashis M, Kenneth L, Laurent J, et al. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data[J]. Geophysics, 1998, 63(2):692-706.

编辑:赵国宪

Research Methods and the Significance of Palaeodrainage Patterns in Ordovician Buried-hill Carbonate Reservoirs, Tarim Basin

Liu Weifang, Zheng Duoming, Wang Hongqiu, Dong Ruixia, Zhang Ximei, Miao Qing

Abstract: There are two patterns of palaeodrainages, the surface ones and the underground ones in Ordovician carbonate buried hills in Tarim Basin. They are closely relative with the distribution and development of caved and fractured karst reservoirs in buried hills. Underground drainages controls the distribution of large-scaled caves and has a great influence upon huge cracked fractures at the top caused by cave collapse during late phase. Surface drainages are generally erosive in high parts of buried hills and generally solvent in lateral or vertical in low parts while they can be solvent at the two sides and the bottom of drainages. Surface drainages can induce to form fractures due to differentiate compaction of fillings during late diagenesis. During development and evolution of the two patterns of palaeodrainages, they meanwhile play a role of enlarging dissolution to fractures so as to form larger scaled karst cave/fracture system. In the process of researching palaeodrainage patterns in carbonate buried hills, some key research methods are applied, such as the paleogeomorphic construction, the seismic attribute analysis, the frequency division processing, and the azimuth division prestack fracture detection.

Key words: Buried -hill Reservoir; Karst reservoir; Fractured reservoir; Palaeodrainage Pattern; Recognition method; Tarim Basin

Liu Weifang; male, D Sc, Senior Geology Engineer. Add: PetroChina Northwest Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 535 Yanerwan Rd., Lanzhou, Ganshu, 730020, China