

doi: 10.11720/wtyht.2023.1052

但光箭,周成刚,刘云宏,等. 轮古西地区奥陶系碳酸盐岩古暗河系统地震特征分析[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 290-299. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1052>

Dan G J, Zhou C G, Liu Y H, et al. Seismic characteristics of the paleo-underground river system in Ordovician carbonate paleo-buried hills in the western Lungu area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 290-299. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1052>

轮古西地区奥陶系碳酸盐岩古暗河系统地震特征分析

但光箭¹, 周成刚¹, 刘云宏², 李相文¹, 张亮亮¹, 张明¹, 王春阳¹

(1. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院 库尔勒分院, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 塔里木盆地轮古地区奥陶系碳酸盐岩古潜山内发现了大量岩溶缝洞型油藏, 油气主要富集在缝洞储层中, 这些缝洞储层主要跟碳酸盐岩古潜山内的古暗河系统有关。特别是在轮古西地区, 古暗河系统最为发育, 古暗河系统缝洞储层在纵、横向上具有较强的非均质性, 搞清该区古暗河系统地震地质特征, 是该区缝洞型油藏高效开发的关键。根据现代岩溶暗河特征, 结合该区测井和钻井资料, 建立暗河地质模型, 开展模型正演模拟研究。研究表明, 在致密灰岩背景下发育的地下暗河系统在地震剖面上表现为连续线性的强反射特征, 暗河高度、宽度变窄, 地震振幅变弱。地震上振幅越强, 表明对应的暗河洞穴越大、充填物速度越低; 振幅属性可以较准确地刻画地震上暗河的横向范围, 频率、相位属性可以刻画地震上暗河的轮廓, 但刻画的范围比实际暗河要大; 暗河系统主河道易被泥质充填, 分支暗河道被充填的概率低, 是暗河储层发育的主要场所, 也是油气富集的主要地区。

关键词: 轮古西; 正演; 碳酸盐岩; 古暗河系统

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)02-0290-10

0 引言

中国西部塔里木盆地油气资源丰富, 油气藏类型较多, 其中碳酸盐岩缝洞型油气藏是主要的油气藏类型之一。关于塔里木盆地碳酸盐岩岩溶缝洞储层的研究一直是石油地质领域的热点和难点, 特别是在缝洞储层的正演模拟方面前人做了大量工作, 也得到了许多重要认识。胡中平^[1]、吴俊峰等^[2]、李凡异等^[3]先后对缝洞体形成“串珠状”的机理及形成条件进行了分析, 并进一步讨论了影响“串珠状”反射能量强弱的因素; 闵小刚等^[4]基于非均匀介质正演模拟技术, 总结了溶洞储集体在叠加偏移剖面上的反射特征; 姚姚等^[5]利用随机模型模拟得出用常规频带地震数据可以探测一定规模的溶洞; 孙东等^[6]采用有限差分法求解波动方程, 研究了塔中地区碳酸盐岩洞穴型储集体溶洞与串珠状反射的

位置对应关系、多种串珠形态的成因机制; 马灵伟等^[7]定量分析了缝洞体储层纵横向发育规模、填充物类型及背景围岩对缝洞储集体反射特征的影响; 前人主要从不同规模溶洞、储层各向异性、纵向多层洞穴、缝洞联合体等多个方面开展了碳酸盐岩储层反射特征的正演模拟研究, 所建立的地质模型主要以球形特征的洞穴为主, 对于呈管状结构的地下暗河的地震正演模拟研究很少。

塔里木盆地的轮古油田其主体为碳酸盐岩暗河型缝洞油藏^[8]。该区奥陶系为典型的碳酸盐岩潜山, 受长期强烈的风化、淋滤、剥蚀和溶蚀作用, 发育大量与古暗河相关的缝洞储层, 储层的非均质性非常强, 该区的油气也主要富集在这些缝洞储层中^[9]。由于前期对该区奥陶系古暗河系统的发育规律、暗河充填程度、暗河储层地震地质特征认识不清, 造成该区在实际钻探中 50% 的井因未钻遇优质缝洞储层而失利。因此在轮古地区开展暗河系统特

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 东方地球物理公司重点科研项目“中西部叠合盆地走滑断裂地震识别技术及成藏控制作用研究”(03-02-2022)

第一作者: 但光箭(1977-), 男, 本科, 高级工程师, 2000年毕业于西南石油大学应用地球物理专业, 主要从事针对塔里木碳酸盐岩缝洞型油藏勘探开发的地震地质综合研究工作。Email: danguangjian@cnpc.com.cn

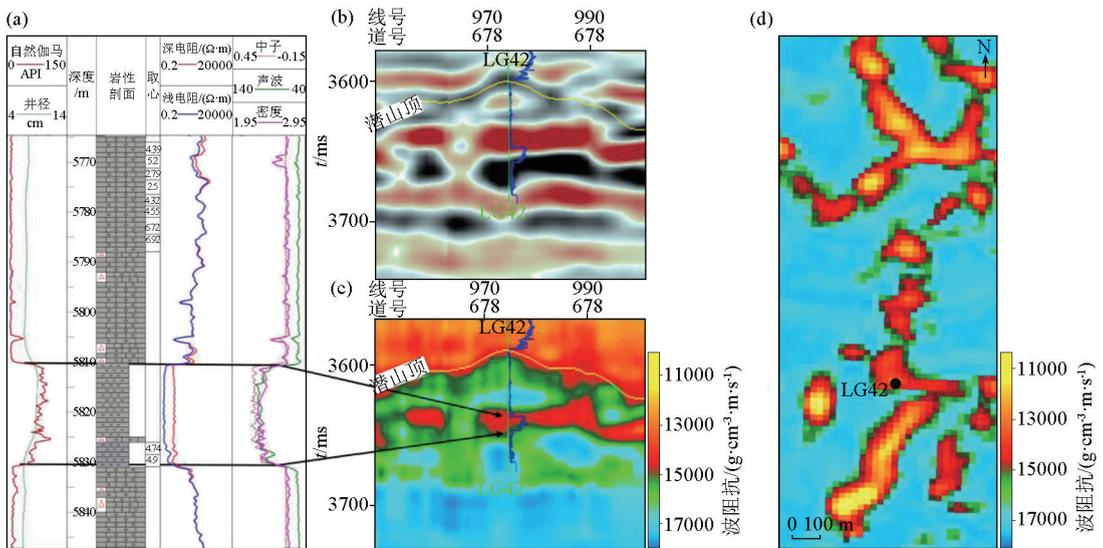
征的研究是十分的必要。本次研究在充分吸收前人认识的基础上,通过建立不同类型的暗河三维地质模型,利用三维正演数值模拟技术,研究不同长度、高度、充填物类型等因素对暗河地震响应特征的影响,为在地震上预测暗河的空间分布、寻找优质的与暗河相关的缝洞储层提供了一定的依据。

1 暗河地震特征

塔里木盆地轮古地区在地质年代史上经历了多期构造运动,特别是受到早海西期多次构造抬升作用^[10],造成奥陶系碳酸盐岩上覆的泥盆系、志留系及中上奥陶统被剥蚀,同时受大气淡水淋滤作用的影响,形成了古潜山岩溶地貌,碳酸盐岩潜山内幕受大气淡水沿断裂、裂缝溶蚀作用,形成大量大小、长度不一的暗河和孤立洞穴,尤其暗河最为发育^[11]。从现代岩溶发育特征来看,暗河是指碳酸盐岩中发育的地下河,是由于地表径流沿岩石裂隙渗入地下,岩石经过溶蚀、坍塌以及水的搬运,在地下形成了大

小不同、长短不一、错综复杂的管道系统,而每一个洞穴也是一个大的暗河系统的一部分。洞穴不同部位宽度、高度变化较大,洞穴内低洼位置易被泥质充填^[12]。

在塔里木盆地轮古地区有大量的钻井在奥陶系碳酸盐岩中钻遇了洞穴,洞穴里大多被砂泥质充填。轮古西地区的 LG42 钻井显示在井深 5 810~5 831.5 m 段钻遇一个砂泥岩充填的大洞穴,井眼处钻遇洞穴高度达 21.5 m(图 1a)。从测井曲线上看,钻遇暗河的位置测井曲线表现为高伽马、低电阻、低密度和高声波时差的特点^[13](图 1a),与围岩致密灰岩的测井曲线值有明显的差异。通过井震标定,发现井上钻遇洞穴位置在地震剖面上表现为强反射地震特征(图 1b、d),且在地震上横向连续延伸较远,说明暗河区域与周围致密灰岩相比,存在较大的速度差,所以才在地震上表现为强反射的界面。在波阻抗剖面上,暗河表现为低阻抗特征(图 1c),表明暗河内存在较多的空隙空间或低速岩性充填,造成暗河地层速度远小于周围致密灰岩的速度。



a—LG42 井奥陶系柱状图;b—过 LG42 井地震剖面;c—过轮古 42 井反演剖面;d—LG42 井区奥陶系潜山反演属性平面

a—columnar chart of ordovician of well LG42;b—seismic sections through well LG42;c—inversion section through well LG42;d—the inversion attribute plane map of Ordovician buried hill in LG42 well area

图 1 LG42 井暗河井震标定

Fig. 1 Calibrating downhole seismic chart of underground river of well LG42

根据目前已钻井钻遇洞穴的地震特征和地震属性预测,在轮古地区主要识别出 3 种暗河地震相特征:连续强反射、杂乱点状强反射、杂乱点状弱反射(图 2a)。

1) 连续状强反射地震相特征。在碳酸盐岩潜山内幕出现地震同相轴能量连续增强的特征,大多以一个强波谷伴随一个强波峰,与围岩差异明显(图 2a)。普遍第一个波谷振幅值最大,对应洞顶反

射。利用均方根振幅属性可以较好识别其展布特征(图 2b)。这种地震相特征钻井揭示主要为大型暗河河道。

2) 杂乱点状强反射地震相特征。在地震剖面上表现为多个点状强反射纵向上杂乱分布,平面属性却在一条线上,该类地震相特征可能反映了沿暗河纵向上多层洞穴的特征(图 2a、b)。这种特征暗河,钻井揭示暗河纵向规模较大,发育多层洞穴。

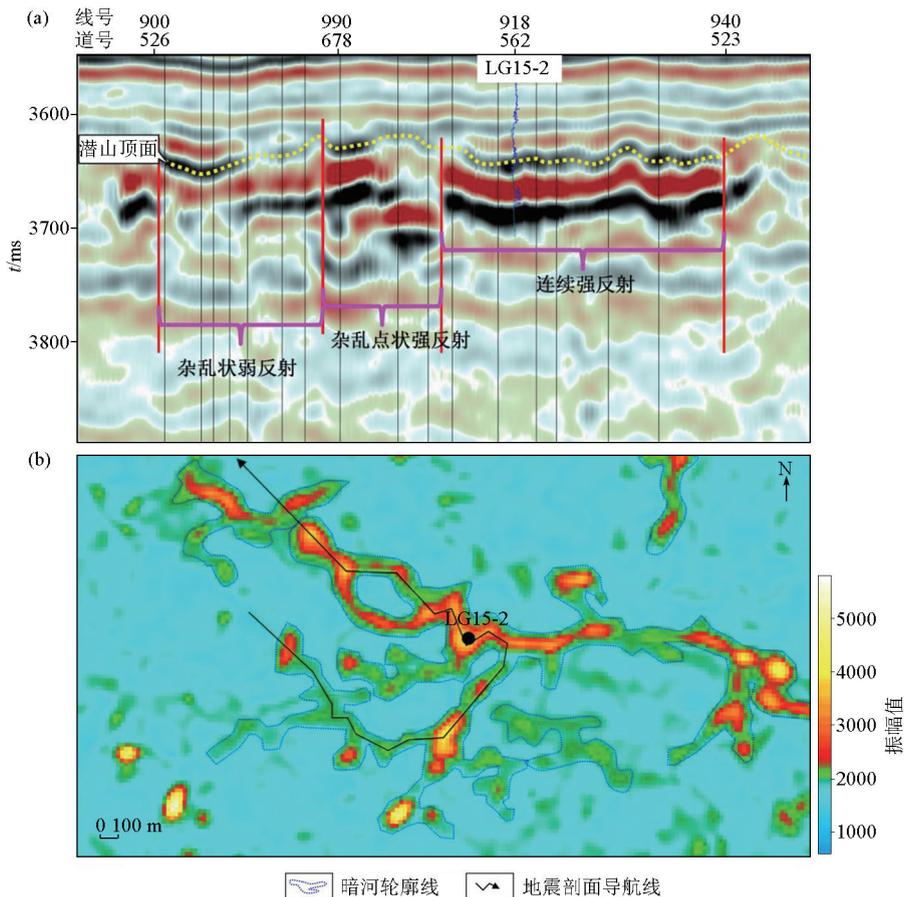


图 2 过暗河地震剖面(a)和 LG15-2 井区奥陶系潜山振幅属性平面(b)

Fig. 2 Seismic profile along the underground rivers (a) and planar graph of amplitude attribute of Ordovician buried hill in LG15-2 well area (b)

3) 杂乱点状弱反射地震相特征。在地震剖面上表现为杂乱弱反射,产状杂乱,无明显特征,仅振幅比围岩略有增强,与围岩差异较小(图 2a),平面属性上略增强的振幅也在一条线上,这类暗河钻井揭示暗河规模较小,以裂缝孔洞储层为主。

2 暗河系统地震正演模拟

为了进一步论证深埋于地下的暗河在地震资料上的反射特征,开展了暗河的三维正演模拟。在对研究区碳酸盐岩暗河地震相特征分析的基础上,采用基于井震标定的方法,建立符合轮古地区奥陶系古暗河系统典型地质模型,采用多规模、多方位暗河模拟条件,探讨不同类型地震相的成因,为该类储层预测由定性向定量发展提供理论指导。

2.1 暗河不同段宽度变化的三维正演模拟

图 3 为暗河三维正演模型和暗河三维正演速度模型。为了更能真实模拟深埋 5 000 m 以下的古暗河的地震响应特征,模型设计时完全参考实际钻井揭示的地层参数,暗河上覆地层和围岩模型完全按

测井真实地层速度和地层厚度进行速度建模。设计的暗河长度为 2.43 km,宽度为 10~50 m,暗河洞穴高度都为 25 m,暗河洞穴里设计为砂泥质充填,充填速度为 4 000 m/s,暗河围岩的速度为 6 100~6 300 m/s,暗河埋深设计跟研究区真实暗河埋深一致(5 500~6 000 m)。整个三维正演方法采用完全模拟真实地震采集的波动方程正演。图 4 为暗河三维正演模拟地震成果剖面,从图中可以看出,暗河发育的区域,地震剖面上表现为强波峰和强波谷特征(图 4 中①);在暗河河道宽的位置,表现为连续性强振幅特征,在横切暗河宽河道地震剖面上,地震上表现为强“串珠状”特征(图 4 中③);在洞穴狭窄部位振幅较弱,在横切暗河窄河道地震剖面上,地震上表现为弱“串珠”杂乱反射特征(图 4 中②)。为了进一步分析什么属性对地震剖面上暗河的反射识别最敏感,利用正演地震成果数据提取了均方根振幅、峰值频谱频率、平均瞬时相位等 3 种属性(图 5),在正演地震成果均方根振幅属性平面图上(图 5b),暗河位置表现为线性的强反射特征,振幅与围岩基质地震反射有明显差异,振幅属性平面上暗河轮廓与

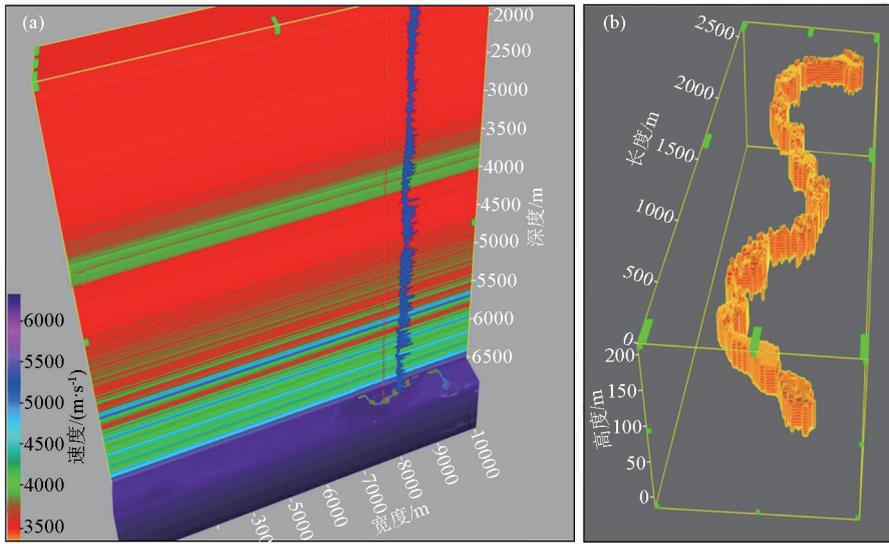


图 3 三维正演速度模型 (a) 和暗河三维地质模型 (b)

Fig. 3 Three dimensional forward velocity model (a) and three dimensional geological model of underground river (b)

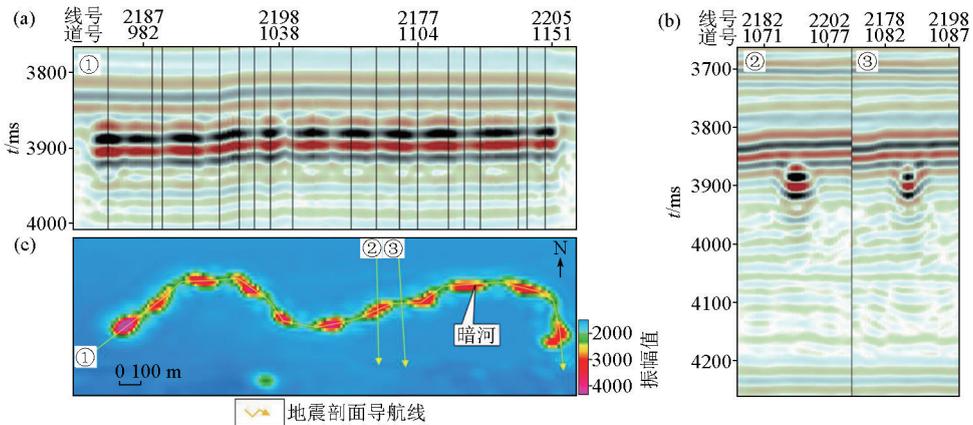


图 4 正演成果地震剖面 (a)、(b) 和正演成果振幅属性平面 (c)

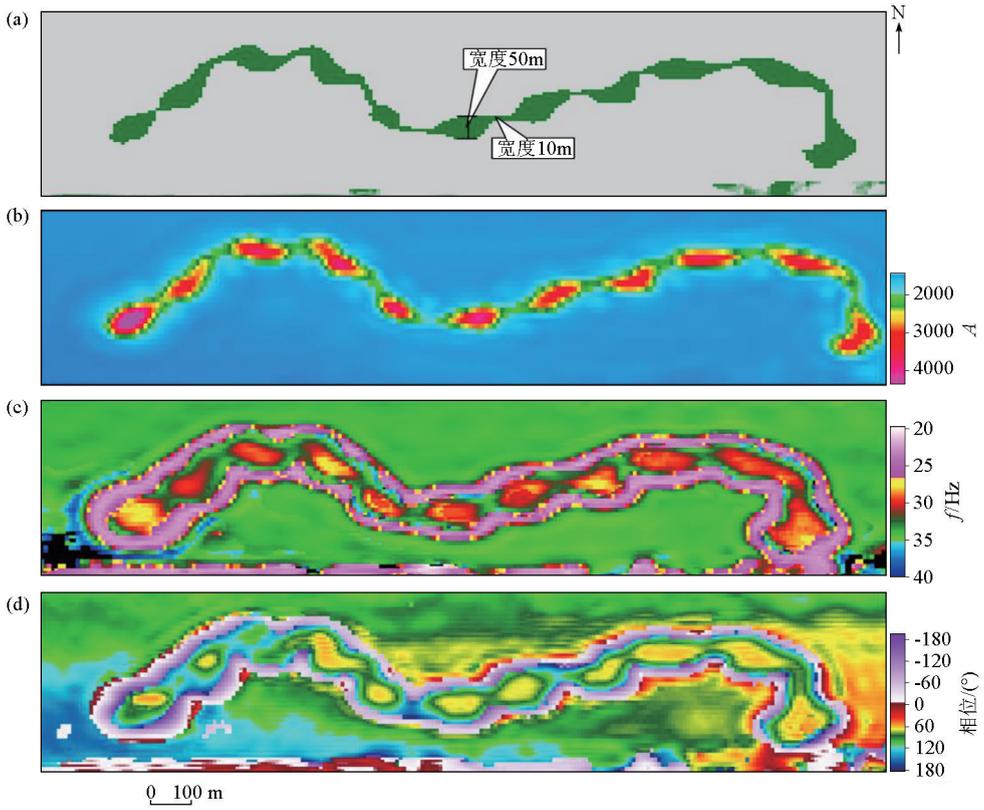
Fig. 4 Seismic profile of forward results (a)、(b) and planar map of amplitude attribute of forward results (c)

暗河地质模型平面特征十分吻合。这也进一步证明了深埋地下的古老暗河相对于围岩在地震上反映为连续性振幅反射。在正演成果峰值频谱频率属性平面图和平均瞬时相位属性平面图上(图 5c、d),这两种属性反映的暗河形态特征都十分清楚,但对暗河形态轮廓都有放大效应。暗河横向宽度大的地方,地震峰值频率高,地震平均瞬时相位低;暗河横向宽度变窄的地方,地震峰值频率低,地震平均瞬时相位变高。暗河与围岩交界处呈现一圈地震峰值频率最低、地震瞬时相位反相的特征,这种振幅、频率、相位变化特征为解释人员识别暗河空间分布特征提供了依据。

2.2 不同充填程度、纵向多层暗河的正演模拟

根据现代岩溶发育特征可知,碳酸盐岩地区发育的地下暗河结构十分复杂,大小从不到 1 m 到上百米,空间上暗河多层叠置。并且深埋地下的古暗河内部大多被充填,有的地方被砂泥质充填,有的地

方被垮塌的灰岩角砾岩充填,暗河内部非均质性强^[14]。为了能更真实地模拟深埋地下的暗河特征,我们建立了一条形态变化大、各段充填程度不同、纵向多层的暗河模型(图 6a),暗河最宽洞穴段高宽均为 40 m,暗河最狭窄段洞穴高宽均为 5 m。图中暗河不同的颜色代表洞穴充填速度不同,充填速度由 3 000~6 000 m/s 变化,代表未充填、砂泥质充填、灰岩角砾充填、灰岩破碎带等不同物性的充填。图 6b 为对应的正演成果地震剖面,从地震剖面上可以看出,暗河洞穴大、充填速度低的部位,地震响应最强,表现为连续性振幅特征;暗河洞穴狭小部位,即使洞穴未充填,在地震剖面上地震响应特征也不明显,难以识别。当多层暗河洞穴纵向叠置时,如图 6a 地质模型中间位置,三层暗河洞穴纵向叠置,受地震纵向分辨率的限制,地震上仅表现为多了一个强波峰强波谷,从地震上难以分出这三层洞穴的界限。总的来说,暗河洞穴地震反射波实际上是暗河顶底面

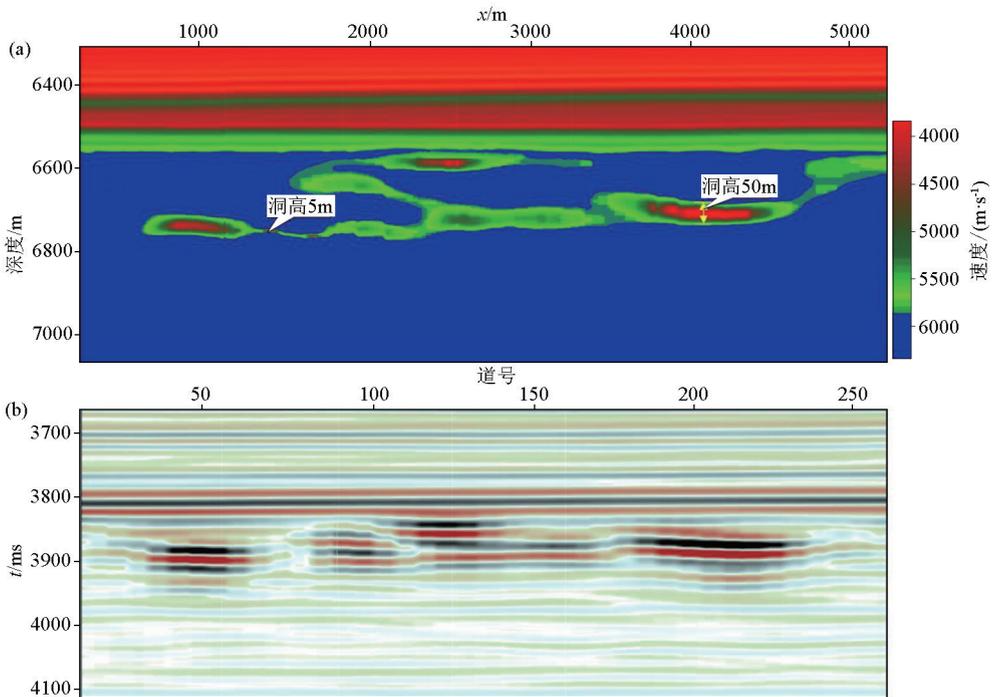


a—暗河地质模型平面; b—正演成果振幅属性平面; c—正演成果峰值频谱频率属性平面; d—正演成果平均瞬时相位属性平面

a—geological model; b—planar map of amplitude attribute; c—planar map of peak spectral frequency; d—planar map of average instantaneous phase

图 5 暗河地质模型平面图和正演地震成果振幅、频率、相位属性平面

Fig. 5 Plan of underground river geological model and plan of amplitude, frequency and phase attributes of forward seismic results



a—正演地质模型; b—正演地震剖面

a—forward geological model; b—forward seismic profile

图 6 不同充填程度暗河地质模型和正演成果地震剖面

Fig. 6 Geological model of underground river with different filling degree and seismic profile of forward modeling results

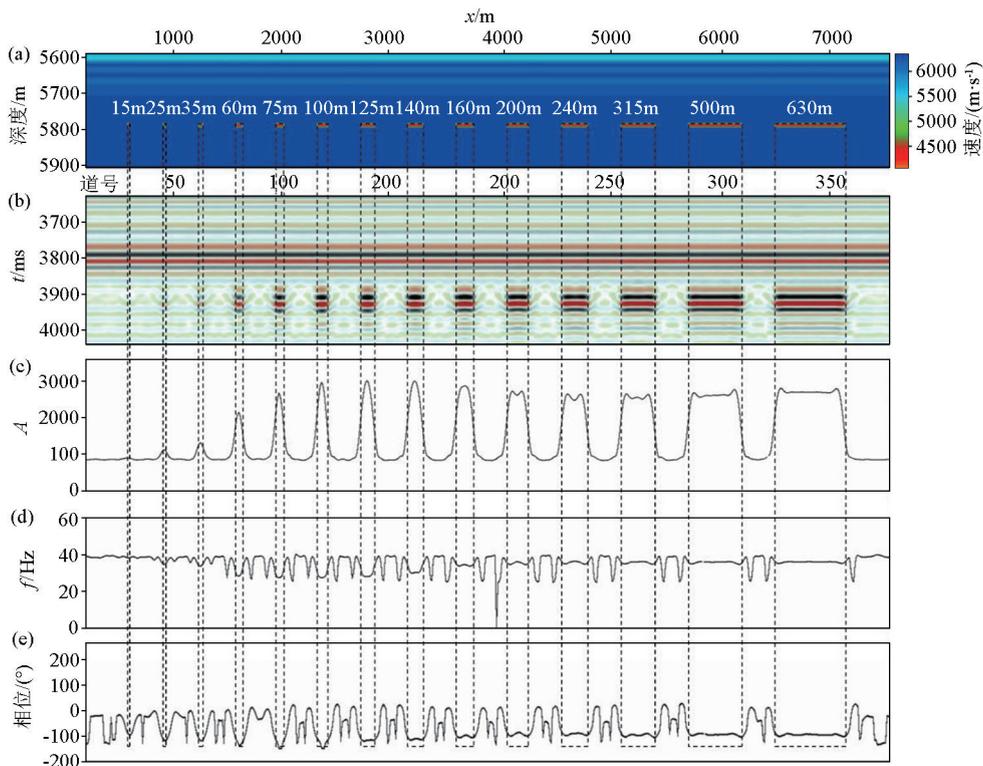
反射波及顶底面之间的多次波复合的结果^[15],地震振幅越强,表明对应的暗河洞穴越大、充填物速度越低,在碳酸盐岩内幕属性平面上成线性分布的强振幅异常反射,可能是一条暗河,只是暗河不同段大小、充填情况不一样。

2.3 暗河长度变化与地震反射特征关系

暗河空间纵、横向尺度变化会引起暗河的地震反射的振幅、频率、相位变化,研究这些参数与暗河空间大小之间的关系具有十分重要的意义,对实际地震资料中暗河型缝洞储层参数的估算及储层评价能够提供一定的依据。

图 7 为高度相同长度变化的暗河模型正演与对应地震属性曲线。在这次正演中,共设计了 14 个由短到长变化的圆形管道状暗河地质模型(图 7a),固定暗河管道的直径(15 m),只变化暗河管道的长度。暗河的地质模型长度从左到右的变化分别是:15、25、35、60、75、100、125、140、160、200、240、315、500、630 m。暗河充填速度为 4000 m/s,背景围岩速度为 6 200~6 300 m/s,暗河埋深为 6 000 m。图 7b 为管道状暗河正演地震偏移叠加剖面,从正演地震剖面中可以看出随着暗河长度的增加,暗河对应

位置的地震特征有较大的差异。为了直观地描述暗河长度的变化对地震波场特征的影响,对理论模型中提取的地震属性参数与模型地震响应进行了相关对比分析(图 7c、d、e)。从图 7c 可以看到:当暗河长度在 100~125 m 时,暗河对应的地震振幅最强(3 050);暗河长度小于 125 m 时,随着暗河长度的减小,暗河对应的地震振幅在减小;当暗河长度在 15 m 时,对应的地震振幅(900)减小到与地震背景振幅(850)相差无几,在地震上识别出暗河特征较为困难;暗河长度由 125 m 变长到 200 m 时,地震振幅在变小;暗河长度大于 200 m 后,地震振幅趋于稳定,振幅值为 2700。在峰值频谱频率曲线图上(图 7d),暗河长度从 15 m 增加到 100 m 时,暗河对应的地震峰值频谱频率在减小,暗河长度由 100 m 增加到 200 m 时,暗河对应的地震峰值频谱频率在增大,暗河长度大于 200 m 后,暗河对应的地震峰值频谱频率基本为一恒定值;在平均瞬时相位曲线图上(图 7e),相位的变化与暗河地震峰值频谱频率具有相似的变化特征。暗河长度在地震记录上的分辨率取决于地震资料偏移处理的效果,由于一个绕射波偏移后的理想效果是能量集中在一个以 1/4 的波长



a—地质模型;b—正演成果剖面;c—暗河地震反射振幅曲线;d—暗河地震反射峰值频谱频率曲线;e—暗河地震反射平均瞬时相位曲线
a—geological model;b—forward modeling result;c—seismic reflection amplitude curve of underground rivers;d—peak spectrum frequency curve of underground rivers seismic reflection;e—average instantaneous phase curve of underground rivers seismic reflection

图 7 高度相同长度变化的暗河模型正演与对应地震属性曲线

Fig. 7 Forward modeling of underground river model with the same height and length variation and corresponding seismic attribute curve

为半径的圆内,也即地震数据实施偏移处理后的第一费涅耳带的半径为 $1/4$ 的波长。在本次正演中,上覆地层平均速度为 $3\ 432\ \text{m/s}$,频率 $35\ \text{Hz}$ 时,波长可达 $98\ \text{m}$,在此情况下暗河的横向分辨率为 $49\ \text{m}$,也就是 $49\ \text{m}$ 长的暗河是可以准确识别的,图 7c 正演暗河地震振幅曲线上也可以看出,从暗河长度为 $60\ \text{m}$ 的模型开始振幅曲线的半幅点位置的宽度与暗河的长度是一致的。从图 7c、图 7d、图 7e 中可以看出振幅、频率、相位 3 种属性对应不同长度的暗河都有属性特征的变化,都可以用来识别暗河,但振幅属性的识别精度最高。

3 暗河系统地震识别与储层分布

3.1 暗河系统地震识别

前面利用井震标定和正演模拟,证实了碳酸盐岩中深埋地下的暗河在地震上表现为连续性强反射特征,地震上平均瞬时相位、峰值频谱频率、均方根

振幅等属性都可以反映暗河空间的展布,但识别暗河精度最高、效果最好的地震属性还是均方根振幅属性。采用均方根振幅属性对轮古西—轮古 7 地区奥陶系暗河进行预测。图 8 为轮古西—轮古 7 地区奥陶系潜山以下 $0\sim 100\ \text{ms}$ 振幅均方根属性平面,图上连续的呈管道状的强振幅和呈点状有规律线性展布的强串珠均是暗河,连续强振幅特征的暗河表明该段暗河管道大,暗河内可能仅为低速充填物(泥岩、砂岩)或未充填;振幅时强时弱,但平面上仍是呈一条线性分布,这样的暗河在振幅弱的地方可能是暗河管道小或暗河内部充填了垮塌的灰岩角砾,但仍是暗河管道存在,在振幅强的位置,如果纵向发育多套强波峰波谷,该段暗河可能就是此区域暗河洞穴纵横向规模变大了,或者是多层洞穴叠置区域。在轮古西—轮古 7 地区,利用均方根振幅属性,识别出 95 条相暗河系统,为该区下步针对暗河型油藏的滚动开发奠定了基础。

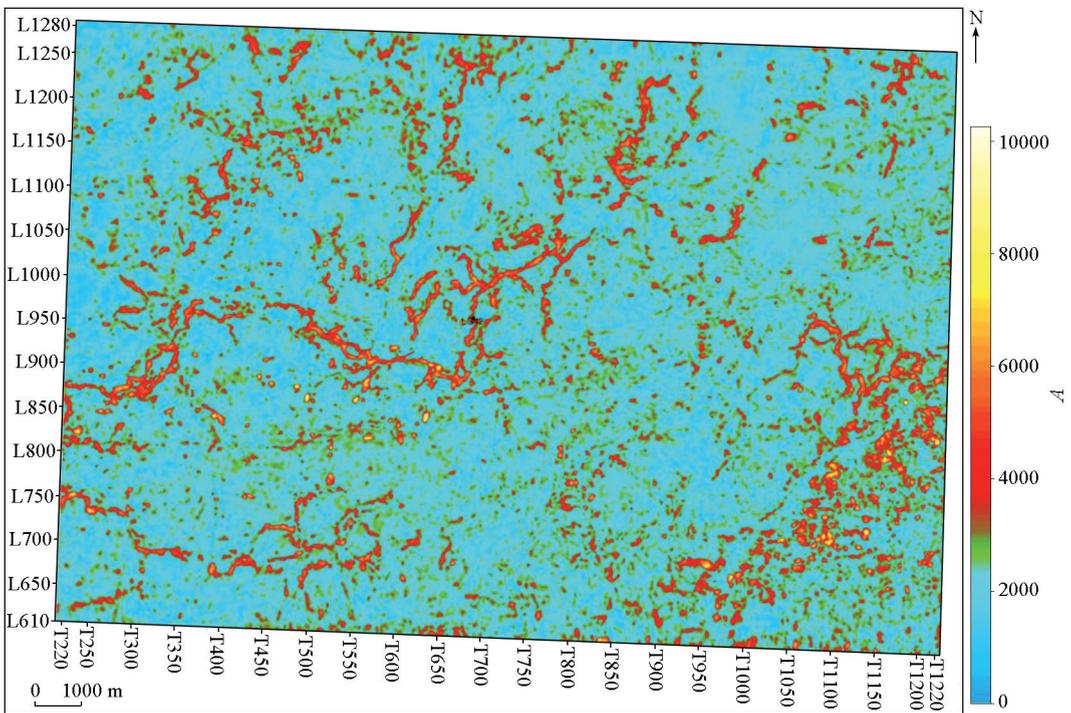


图 8 轮古西—轮古 7 地区奥陶系潜山以下 $0\sim 100\ \text{ms}$ 地震振幅均方根属性平面

Fig. 8 Plan of root mean square attribute of $0\sim 100\ \text{ms}$ seismic amplitude under Ordovician buried hill in Lunguxi-Lungu 7 area

3.2 暗河系统储层分布

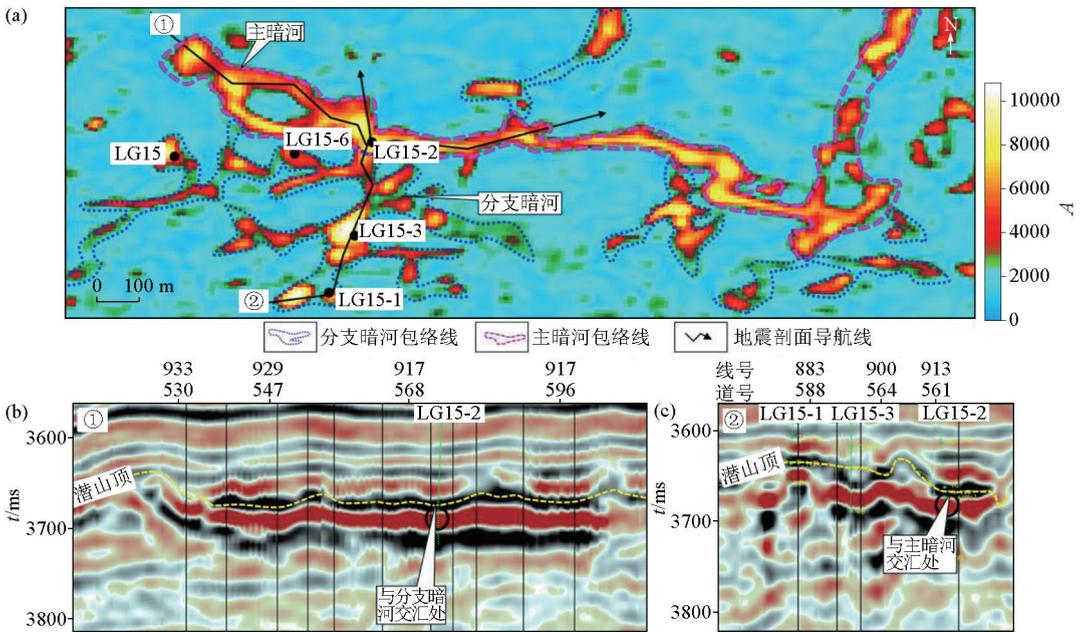
根据现代岩溶特征,通常暗河具有独立的补给、径流和排泄系统^[16],大的暗河可形成地下河系,跟地表水系一样,通常有主河道和分支河道,具有很大的流量^[17]。在轮古油田奥陶系潜山区,暗河大量发育,一些大的暗河十分复杂,形成暗河系统。图 9 为

轮古 15 井区暗河系统平面、剖面图,从图中可以看出,该暗河系统是由主河道和分支河道组成,主暗河延伸较长,规模较大,如图 9 中①剖面,主暗河在整个暗河系统中所处位置最低,暗河管道大,地震剖面和振幅属性平面上都表现为连续的强振幅特征;暗河分支延伸短,位置较浅,规模小,部分暗河管道狭

窄,地震剖面 and 属性平面图上表现为线性点状强反射,如图 9 中②剖面。每个暗河系统都有多个入水口和出水口,入水口主要在主暗河的高部位和暗河分支的高部位,出水口主要分布在主暗河低部位,暗河水最终汇聚到主暗河里流入明河。

根据暗河系统的发育规律分析,暗河系统储层可能发育的位置为暗河主河道、暗河分支河道以及暗河洞顶破碎带或叫暗河洞顶缝^[18]。暗河主河道是整个暗河系统水流的主要通道^[19],由于其位于整个暗河系统的低部位,易被砂泥质充填。以轮古地区的 LG15-2 井所钻探的暗河主河道为例(图 9 的①)。暗河主河道上 LG15-2 井在井深 5 810~5 843 m 处钻遇一大型充填洞穴,洞穴高达 33 m,洞内被砂泥质充填,储集空间有限,造成这口井产油较少,为低效井。统计显示轮古油田有 11 口井钻遇暗河主河道上,均被砂泥质充填,产油气较少,表明暗河主河道由于被砂泥质充填不是暗河储层发育的有利

位置^[20]。暗河的分支河道是主暗河的各个分支,也是主暗河水流的补给处。暗河分支河道位于整个暗河系统的较高位置,主要为暗河的水流补给通道,水动力强,不易被泥质充填,洞穴储层更为发育,也最容易成藏^[21]。图 9c 为过分支暗河地震剖面,在该分支暗河上,钻探了 2 口开发井 LG15-1、LG15-3, LG15-1 位于分支暗河高部位,构造位置高且储层最发育,累产油 23 万 t; LG15-3 井构造位置相对于 LG15-1 井稍低,累产油 6 万 t,从产能来看,说明 LG15-1 井所在的暗河储层十分发育,暗河没有被泥质充填,储集空间大。轮古 15 井区暗河系统上共钻探了 5 口井,开发过程中针对同一暗河系统上的井进行注水替油实验,发现 LG15-2 注水,分支暗河上 LG15-6、LG15-3、LG15 等井均出现了压力变化,说明分支暗河河道并没有完全充填,是可以过暗河河道连通的。



a—LG15 井区奥陶系潜山振幅属性平面; b—过主暗河地震剖面; c—过分支暗河地震剖面

a—rms amplitude attribute map; b—seismic profile of the main underground river; c—seismic profile of the branches underground river

图 9 轮古 15 井区暗河系统平面、剖面

Fig. 9 Plan and section of underground river system in Lungu 15 well block

暗河洞顶缝、洞顶破碎带也是暗河有利储层发育区^[22]。轮古地区的 LG100 井在井深 5 506~5 515 m 处钻遇大型洞穴,但洞穴里岩性为泥质粉砂岩,已经被填充,为暗河河道位置。但在洞穴上方发育近 40 m 的 II、III 类洞顶缝储层,以孔洞型和裂缝孔洞型为主。洞顶缝储层与下部的洞穴至今均产油气,累计产油 7.9 万 t。这就表明:暗河洞顶破碎带、洞顶缝也是有利的储集空间。

4 认识与结论

通过正演模拟并结合地震、地质对轮古西地区奥陶系古岩溶暗河系统的综合分析研究,得出结论:

1) 在致密灰岩背景下发育的地下暗河系统在地震剖面上表现为地震同相轴连续强反射特征,振

幅属性平面图上呈线性展布;地震剖面上地震同相轴为点状强反射,振幅属性平面图上连续多个点状强反射成线性分布,这样的特征也是暗河的响应,只是暗河不同段大小、充填情况不一样。

2)模型正演显示暗河的长度、宽度的变化影响其地震振幅强弱的变化,暗河宽度一定的情况下,长度在一个波长以下时,地震响应振幅随暗河长度增加而增强,长度在一个波长时,振幅最强,随后随着长度增加振幅减弱,长度超过一个半波长后,地震响应振幅趋于稳定。暗河长度大于 $1/2$ 地震波长时,地震资料可以较准确地刻画出暗河的长度。单纯根据地震振幅的强弱,不能判断暗河的孔隙度大小,但地震上暗河位置振幅越强,其所反映的储集空间也越大。

3)振幅属性可以较准确地刻画地震上暗河的横向范围,而频率、相位属性可以刻画地震上暗河的轮廓,但刻画的范围比实际暗河要大。

4)暗河系统与地表明河系统相似,主河道位置低,为汇水区,晚期易被泥质充填;分支暗河位置高、坡度陡,被充填的概率低,是暗河储层发育的主要部位,是油气富集的主要空间。

参考文献 (References):

- [1] 胡中平. 溶洞地震波“串珠状”形成机理及识别方法[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(4): 423-426.
Hu Z P. Mechanism and distinction method for the seismic "string beads" characteristic [J]. West China Petroleum Geosciences, 2006, 2(4): 423-426.
- [2] 吴俊峰, 姚姚, 撒利明. 碳酸盐岩特殊孔洞型构造地震响应特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(2): 180-185.
Wu J F, Yao Y, Sa L M. Analysis on seismic response of special cavernous structure of carbonate [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(2): 180-185.
- [3] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 385-391.
Li F Y, Wei J X, Di B R, et al. Research on the mechanism of the formation of the "beaded" seismic reflection characteristics of carbonate karst caves [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 385-391.
- [4] 闵小刚, 顾汉明, 朱定. 塔河油田孔洞模型的波动方程正演模拟[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 187-191.
Ming X G, Gu H M, Zhu D. Wave equation forward modeling of cavern models in Tahe oil-field [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 187-191.
- [5] 姚姚, 唐文榜. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 623-629.
Yao Y, Tang W B. Theoretical study on the detectability of deep carbonate karst weathered crust-cavity fractured oil and gas reservoirs [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(6): 623-629.
- [6] 孙东, 潘建国, 雍学善, 等. 碳酸盐岩储层垂向长串珠形成机制[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 101-104.
Sun D, Pan J G, Yong X S, et al. Formation mechanism of vertically long beads in carbonate reservoirs [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 101-104.
- [7] 马灵伟, 顾汉明, 赵迎月, 等. 应用随机介质正演模拟刻画深水区台缘礁碳酸盐岩储层[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(4): 583-590.
Ma L W, Gu H M, Zhao Y Y, et al. Using forward modeling of stochastic media to characterize carbonate reservoirs in platform margin reefs in deep water [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(4): 583-590.
- [8] 韩杰, 洪涛, 朱永峰, 等. 轮古油田奥陶系潜山洞穴型储层发育特征及油气分布控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 1-8.
Han J, Hong T, Zhu Y F, et al. Characteristics of Ordovician buried-hill cave reservoir and controlling factors of petroleum distribution of Lungu oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 1-8.
- [9] 张军林, 田世澄, 郑多明. 塔北隆起西部缝洞型碳酸盐岩储层表征与评价[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 497-503.
Zhang J L, Tian S C, Zheng D M. Characterization and evaluation of fracture-cavity type carbonate reservoir in the western part of Northern Tarim uplift [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 497-503.
- [10] 徐国强, 刘树根, 李国蓉, 等. 向源潜流侵蚀岩溶作用及其成因机理——以塔河油田早海西风化壳岩溶洞穴层为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(1): 35-40.
Xu G Q, Liu S G, Li G R, et al. The mechanism of retrogressive erosion and karstification: A case study of cave formation in early hercinian weathered crust in tahe oilfield [J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(1): 35-40.
- [11] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 塔里木盆地塔河油田岩溶峡谷区海西早期洞穴系统发育模式[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 364-372.
Li Y, Lu X B, Cai Z X, et al. Development model of Hercynian cave system in karst canyon area of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 364-372.
- [12] 李宗杰, 王勤聪. 塔河油田奥陶系古岩溶洞穴识别及预测[J]. 新疆地质, 2003, 21(2): 181-184.
Li Z J, Wang Q C. Identification and prediction of Ordovician ancient karst caves in Tahe Oilfield [J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(2): 181-184.
- [13] 赵军, 祁兴中, 夏宏权, 等. 测井资料在碳酸盐岩洞—裂缝型储层产能评价中的应用[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 99-104.
Zhao J, Qi X Z, Xia H Q, et al. Application of well logging data in productivity evaluation of carbonate cave-fracture reservoir [J]. Geoscience, 2003, 17(1): 99-104.
- [14] 罗泉, 刘俊锋, 韩杰, 等. 塔里木盆地轮古潜山暗河发育特征及其与油气富集的关系[J]. 海相油气地质, 2018, 23(4): 27-34.
Luo X, Liu J F, Han J, et al. Development characteristics of underground river and its relationship with oil and gas accumulation in

- Lungu buried-hill, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23(4): 27-34.
- [15] 孙海宁, 王晓梅, 刘来祥. AVO 技术在识别充填流体溶洞中的应用 [J]. *物探与化探*, 2008, 32(4): 397-400.
- Sun H N, Wang X M, Liu L X. The application of avo to the prediction of water-eroded caves filled with liquids for carbonate reservoirs [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(4): 397-400.
- [16] 张娟, 鲍典, 杨敏, 等. 塔河油田西部古暗河缝洞结构特征及控制因素 [J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(4): 33-39.
- Zhang J, Bao D, Yang M, et al. Analysis on fracture-cave structure characteristics and its controlling factor of palaeo-subterranean rivers in the western Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(4): 33-39.
- [17] 朱学稳. 桂林地区灰岩洞穴的溶蚀形态 [J]. *中国岩溶*, 1982, 1(2): 93-103.
- Zhu X W. Dissolution features of limestone caves in Guilin area [J]. *Carsologica Sinica*, 1982, 1(2): 93-103.
- [18] 雷川, 陈红汉, 苏奥, 等. 塔河地区奥陶系深埋岩溶洞穴特征及保存机制初探 [J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(2): 27-31.
- Lei C, Chen H H, Su A, et al. Characteristics and preservation mechanism of the Ordovician deep burial karst caves in Tahe area [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(2): 27-31.
- [19] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(1): 1-7.
- Li Y. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2012, 36(1): 1-7.
- [20] 徐微, 陈冬梅, 赵文光, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞发育规律 [J]. *海相油气地质*, 2011, 16(2): 34-41.
- Xu W, Chen D M, Zhao W G, et al. Development regularity of karstic caverns of Ordovician carbonate reservoirs in Tahe oilfield [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(2): 34-41.
- [21] 张林艳. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏的储层连通性及其油(气)水分布关系 [J]. *中外能源*, 2006, 11(5): 32-36.
- Zhang L Y. Reservoir connectivity and oil-water relationship of rock dissolved Carbonate oil reservoir in Tahe Oilfield [J]. *China Foreign Energy*, 2006, 11(5): 32-36.
- [22] 王立静. 塔河油田 12 区碳酸盐岩油藏溶洞特征研究 [J]. *内蒙古石油化工*, 2010(1): 120-122.
- Wang L J. Study on Karst cave characteristics of Carbonate reservoir in area 12 of Tahe oilfield [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2010(1): 120-122.

Seismic characteristics of the paleo-underground river system in Ordovician carbonate paleo-buried hills in the western Lungu area

DAN Guang-Jian¹, ZHOU Cheng-Gang¹, LIU Yun-Hong², LI Xiang-Wen¹, ZHANG Liang-Liang¹, ZHANG Ming¹, WANG Chun-Yang¹

(1. Korla Branch of GRI of BGP Inc., Korla 841000, China; 2. BGP Inc., China National Petroleum Corporation, PanJing 124010, China)

Abstract: Many karst fracture-vug reservoirs have been found in the Ordovician carbonate paleo-buried hills in the Lungu area, Tarim Basin. Hydrocarbons are mainly enriched in these fracture-vug reservoirs, which are mainly related to the paleo-underground river system in carbonate paleo-buried hills. The paleo-underground river system is well developed, especially in the western Lungu area. The fracture-vug reservoirs related to the paleo-underground river system have strong longitudinal and lateral heterogeneity, and ascertaining the seismic and geological characteristics of the paleo-underground river system in this area is the key to the efficient development of fracture-vug reservoirs in this area. Based on the characteristics of modern karst underground rivers and the log and drilling data of this area, this study established a geological model of underground rivers for forward modeling. The study results are as follows. The underground river system developing under the tight limestone setting showed continuously linear strong reflections on the seismic profile. The seismic amplitude decreased as the height and width of underground rivers decreased, and higher seismic amplitude corresponded to larger underground river caves and lower filling velocity. The amplitude can accurately characterize the horizontal range of the underground river on the seismic profile. Meanwhile, the frequency and phase can describe the outline of the underground river on the seismic profile, but the outline described was larger than that of the real underground river. The main channels of the underground river system were prone to be filled with mud. By contrast, the branch channels had a low filling probability and thus serve as the main areas for both the occurrence of underground river reservoirs and the hydrocarbon accumulation.

Key words: western Lungu area; forward modeling; carbonate rock; paleo-underground river system