

文章编号:1673-5005(2009)06-0016-06

碳酸盐岩古岩溶储层预测的难点与对策

吴欣松^{1,2}, 魏建新^{1,2}, 昌建波^{1,2}, 韩剑发³

1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:在分析碳酸盐岩古岩溶储层成因特点与预测难点的基础上, 确定针对该类储层进行地震预测的思路与对策, 即首先建立古岩溶储层的地质概念模型, 然后通过实验室地震物理模拟, 确定敏感性地震参数, 最后在井旁地震道属性统计分析的基础上, 对塔里木盆地轮西区块奥陶系风化壳古岩溶储层进行预测。结果表明: 该区早海西期存在 2 个岩溶旋回, 相应地发育 3 套与岩溶作用有关的储层; 平均反射强、均方根振幅、平均能量是反映缝洞型储层的主要敏感性地震参数, 而能量半衰时斜率对于检测裂缝发育带最为敏感; 研究区古岩溶储层的发育主要受岩溶地貌和断裂系统的控制, 具有明显的分带性及叠置性特征。

关键词:古岩溶; 碳酸盐岩; 储层预测; 地球物理勘探; 塔里木盆地

中图分类号:TE 122.2

文献标识码:A

Difficulty and countermeasures in carbonate paleokarst reservoir prediction

WU Xin-song^{1,2}, WEI Jian-xin^{1,2}, CHANG Jian-bo^{1,2}, HAN Jian-fa³

(1. School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Tarim Oilfield Branch Company, PetroChina, Kuler 841000, China)

Abstract: By analyzing genesis characteristics and prediction difficulties of carbonate paleokarst reservoir, the route and countermeasures of carbonate paleokarst reservoir seismic prediction were determined. A geologic conceptual model was first developed, and the sensitive seismic attribute parameters were determined by seismic physics modeling in laboratory. Finally, the reservoir distribution was predicted according to the statistics of near-well seismic traces attributes. The forecast results of the Ordovician weathering crust karst reservoir in Lunxi block, Tarim Basin show that two karst cycles developed in the Ordovician weathering crust of Lunxi block, which formed three sets of reservoirs related to the early Hercynian period karstification. The results of physical modeling show that the main seismic parameters sensitive to the fractural and cavern reservoir are the average reflection intensity, the mean square root amplitude and the mean amount of energy, and the parameter sensitive to the fractural zone is the gradient of energy half attenuation time. The distribution of paleokarst reservoir shows an obvious characteristic of banding and overlaying, which is mainly controlled by the karst topograph and the development of the faults.

Key words: paleokarst; carbonate rock; reservoir prediction; geophysical exploration; Tarim Basin

碳酸盐岩古岩溶型储层的勘探是当前油气勘探的重要领域, 目前已在鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地的下古生界地层中发现了靖边、塔河、轮南、千米桥等大型碳酸盐岩古岩溶型油气田。但是,

古岩溶储层特殊的成因机制决定了其预测的难度要远大于碎屑岩储层和礁滩型储层, 常用的地球物理反演技术也很难适用。为了对碳酸盐岩古岩溶储层开展有效的预测工作, 笔者以塔里木盆地轮西奥陶

收稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家“973”项目(2006CB202300)

作者简介: 吴欣松(1969-), 男(汉族), 安徽宿松人, 副教授, 博士, 主要从事储层地质与石油地质方面的研究工作。

系作为研究对象,针对具有高度非均质的古岩溶储层,开展储层地质建模—地震物理模拟—地震储层预测的系统研究。

1 碳酸盐岩古岩溶储层预测的难点

碳酸盐岩古岩溶储层是指碳酸盐岩在经历沉积埋藏以后受构造抬升作用露出地表,并经过长期的风化溶蚀作用(表生岩溶)以及在深埋过程中由于成岩作用(埋藏岩溶)形成的以溶洞、裂缝和溶蚀孔隙为主要储集空间的储层。由于碳酸盐岩本身成因的特殊性和构造、岩溶作用的非均质性,使得碳酸盐岩古岩溶储层的预测难度极大^[1]。

碳酸盐岩不同于碎屑岩,它是一种化学沉积成因的地层,主要形成于构造相对稳定期,同一时期形成的地层成层性差,从而使得碳酸盐岩内幕的地震反射非常弱。大量的野外地质考察结果表明,先期形成的断裂对岩溶作用的控制十分明显,溶洞和裂缝带的延伸方向与主要断裂的走向关系十分密切。在岩溶期之前形成的大量断裂往往因为断裂两侧无岩性变化而难以识别^[2]。

由岩溶作用形成的碳酸盐岩储层,尤其是裸露期表生岩溶形成的储层,不同于砂岩储层和原生的孔隙性碳酸盐岩储层,其形成几乎很少受沉积作用的影响,而主要受成岩作用(包括胶结作用、交代作用、溶蚀作用)以及后期构造作用、岩溶地貌等多因素的控制。古岩溶储层分布非均质性极强^[3-5],充填类型多样,有效储层的分布往往表现为一个相对孤立的缝洞系统。采用常规的波阻抗反演手段很难对储层的分布作出有效的预测,目前只能依靠地震属性分析手段开展古岩溶储层的预测。

正因为如此,国内外学者十分重视地质建模与地震预测的结合,特别是野外相似露头的精细研究。同时,也十分强调地球物理的正演模拟实验与反演的结合,即从正演入手,探索反映古岩溶储层的地震敏感性参数,反过来为综合利用各种地震属性预测该类储层提供直接依据。

2 碳酸盐岩古岩溶储层预测思路

鉴于碳酸盐岩古岩溶储层与碎屑岩储层在形成及其控制因素方面存在较大的差异,储层预测的方法就无法照搬碎屑岩储层预测的一套模式,必须采取相应的针对性强的措施和对策。

(1)首先,通过野外露头的实际测量、井下岩心详细观察与描述,结合测井储层识别、岩溶地貌的地

震恢复等技术开展综合研究,确定古岩溶作用的分区、分带特征,明确主要储层类型及其分布规律、充填特征,建立研究区古岩溶储层地质概念模型。

(2)从实验室正演物理模拟试验入手,确定不同类型古岩溶储层(洞穴型、孔洞型、裂缝-孔洞型、裂缝型)地震反射特征,优选出能够反映储层的地震敏感性参数,为古岩溶储层预测提供依据。

(3)以地质概念模型为指导,以地震属性分析为主要手段,在合理截取地震时窗的基础上,开展地震多属性综合分析,据此对古岩溶储层的空间分布进行预测,建立古岩溶储层分布模型。

3 碳酸盐岩古岩溶储层预测实例

3.1 研究区概况及古岩溶形成背景

研究区位于塔里木盆地轮南低凸起的西部,轮西大断裂以西的地区,面积近 150 km²。钻探井及评价井共 11 口。研究目的层为奥陶系鹰山组,该组地层以台地相亮晶砂屑灰岩、泥晶灰岩、颗粒泥晶灰岩为主,含燧石团块,底部含云质,岩性脆,厚度大。方解石含量为 85%~98%,平均为 92.8%,白云石含量小于 12.7%,平均为 4.2%, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 平均为 73.4,相对溶解度接近于 1.0。

该区在早海西期,由于区域构造抬升,泥盆系、志留系、中上奥陶统被剥蚀,奥陶系地层仅残留鹰山组和下部的蓬莱坝组地层,同时形成一系列以北东向为主、北西向为辅的断裂。由于遭受长期的风化剥蚀和岩溶作用,形成东高西低的地貌格局。通过对研究区地震反射标志层(石炭系双峰灰岩)实施层拉平技术,恢复了石炭系沉积之前奥陶系的古岩溶地貌。结果表明,研究区的东南部为典型的峰丛洼地地貌区,西北部为峰林谷地地貌区,西部局部为峰林平原地貌区(图 1)。

早海西期,塔里木盆地处在北半球低纬度地区,属热带温暖湿润气候条件,大气降水充沛。岩溶地貌上,轮西地区处于岩溶高地与岩溶盆地之间的斜坡地带,河流坡降及流量大,古水动力作用强烈。适宜的气候条件、良好的可溶岩石、强大的古水动力、长期的风化剥蚀,使得本区碳酸盐岩岩溶极为发育,洞穴及地下暗河发育规模大。

轮西地区早海西岩溶与现代桂林岩溶相比,无论气候条件还是岩溶地貌、地层岩性、断裂系统,都具有很好的相似性。在峰林平原和峰林谷地地貌区实钻发现大量溶洞及地下暗河。洞穴直径一般为 0.5~30 m,溶洞有未充填、半充填、全充填 3 种类

型,充填类型包括泥砂充填、方解石化学充填、垮塌角砾充填等。在峰丛洼地地区,溶洞相对不发育,钻遇率较低,储集空间以裂缝为主。

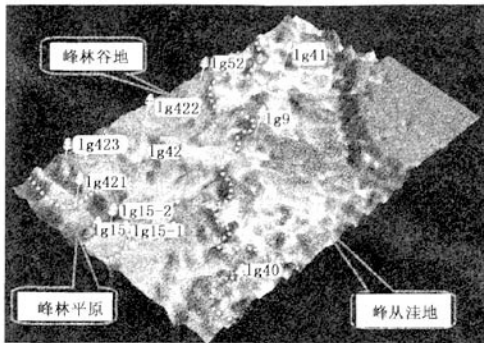


图1 轮西区块井位及早海西期岩溶地貌

Fig.1 Well location in Lunxi block and karst topographic feature of early Hercynian

3.2 古岩溶储层概念模型

储层概念模型是对古岩溶储层发育特征的高度概括,包括储层岩石学特征、岩溶发育特征、储集空间特征等。其目的是揭示岩溶发育的基本规律,同时为地震预测提供地质框架。通过对研究区7口井的岩心资料的观察描述和取样分析,结合常规测井和成像测井解释成果,对该区岩溶作用和储层特征进行了系统的研究,建立了储层概念模型。

轮西地区奥陶系碳酸盐岩基质孔隙度一般小于2%,不能作为有效储层,裂缝和溶蚀孔洞是主要的储集空间。微裂缝极为发育,以构造裂缝为主,风化裂缝主要发育于表层岩溶带和潜流岩溶带。储层类型包括洞穴型、孔洞型、裂缝-孔洞型、裂缝型4种。

轮西地区早海西期至少存在两个岩溶作用旋回(图2),下部旋回形成时间晚,对上部旋回有一定的改造作用。虽然在海平面上升和下降过程中均可发生岩溶作用,但现代岩溶调查表明大规模的岩溶作用及洞穴层的形成主要与海平面的下降过程(地壳抬升)相关。测井岩溶带划分结果表明,本区两个岩溶旋回是地壳两次抬升造成的,上部潜流岩溶带的形成时间要早于下部潜流岩溶带。在构造抬升之后的构造相对稳定期,岩溶作用形成了层状分布的水平潜流岩溶带,同时由于差异溶蚀作用,位于岩溶地貌低部位的井,上部潜流岩溶带有可能被完全风化侵蚀,或者只是残留了一部分,以轮古422(lg422)井最为典型。该井上部潜流岩溶带直接与表层岩溶带相邻。

上部旋回岩溶化程度低,洞穴规模小,下部旋回

岩溶化程度高,发育大型地下暗河。因此,在垂向上可以划分出5个岩溶带,即表层岩溶带、上渗流岩溶带、上潜流岩溶带、下渗流岩溶带、下潜流岩溶带。各岩溶带的厚度具有一定规律性变化,主要受岩溶地貌分区和微地貌的控制。

单井测井成果的统计表明,本区主要发育3套与洞穴有关的储层,储层主要分布于表层岩溶带、上部潜流岩溶带、下部潜流岩溶带。表层岩溶带以裂缝及小型溶洞为主,溶洞距离风化壳顶面越近,充填程度越高;上潜流带以小-中型洞穴为主,充填程度相对较低;下部潜流带发育大型洞穴和暗河,砂泥质充填程度高,但在大型洞穴周围和顶部、周边发育的小型洞穴充填程度低,是主要的油气储集空间。

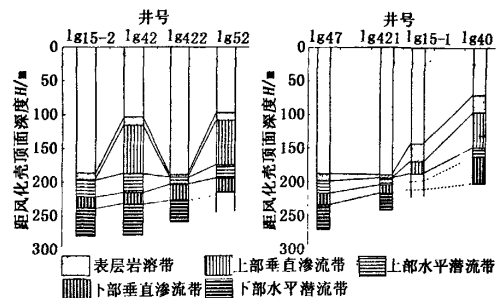


图2 轮西区块奥陶系风化壳岩溶带划分与对比

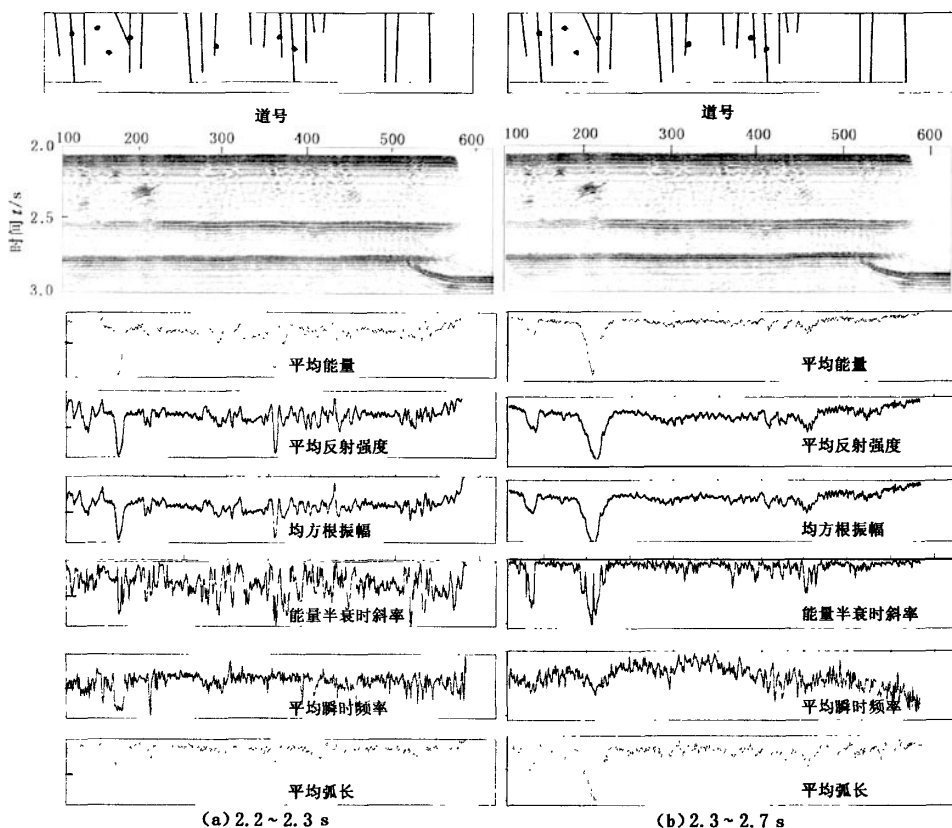
Fig.2 Paleokarst zone division and comparison of Ordovician system weathering crust in Lunxi block

3.3 地震物理模拟及敏感性参数分析

裂缝、溶洞的地震敏感性参数分析是半定量-定量识别古岩溶缝洞型储层的基础。通过制作古岩溶储层非均质(上部以裂缝发育为主,下部溶洞相对发育)地震物理模型,并通过模拟野外地震数据采集和数据处理,获得古岩溶储层的地震响应特征。通过截取不同时窗(上部100 ms代表裂缝发育的表层岩溶带,下部400 ms代表缝洞发育的水平潜流带)内地震属性的对比,从而可以确定储层的地震敏感性参数(图3)。

正演模拟试验结果表明,平均反射强度、均方根振幅、平均能量是反映古岩溶缝洞型储层的敏感性地震属性参数,能量半衰时斜率对裂缝型储层反应比较敏感,这与实际过井地震剖面的属性分析结果也十分吻合。理论上平均反射强度、均方根振幅、平均能量均与地下地质界面反射系数有关,其变化代表储层物性的横向变化。能量半衰时斜率对裂缝发育带的检测比较敏感,它是用于描述能量衰减慢慢的参数,能够突出某些振幅异常,识别地层岩性及物

性的变化。



注:上部为物理模型及实验室得到的模拟地震剖面,物理模型中的线条表示断层和裂缝,圆点表示溶洞;
下部为敏感性参数分析的归一化(0~100)值。

图3 基于地震物理模拟地震敏感性参数分析结果

Fig.3 Sensitive seismic parameter analysis results based on seismic physical modeling

3.4 地震属性提取与神经网络预测

古岩溶地质概念模型研究表明,研究区主要发育3套与古岩溶有关的储层,即表层岩溶带内的以裂缝和小型岩溶洞穴为主的储层,上部水平潜流带内与小-中型岩溶洞穴有关的储层,以及下部水平潜流带内与大型岩溶洞穴有关的储层。研究区主要探井岩溶带划分结果的统计表明:该区表层岩溶带厚度一般为10~30 m,其对应的地震反射时间小于10 ms;下潜流带厚度一般在距离鹰山组底界70 m范围内,对应的地震时间为24 ms。因此,在地震属性分析前,确定了4个地震时窗:第一个时窗为奥陶系风化壳顶面往下10 ms,主要反映表层岩溶带;第二个时窗为蓬莱坝组顶面往上24 ms,主要反映下潜流带;第三个时窗位于上述两个时窗之间,主要反映上渗流、上潜流以及下渗流岩溶带;第四个时窗为蓬莱坝组。

通过对各井旁地震道地震敏感性参数(平均反射强度、均方根振幅、平均能量、平均能量半衰时)与储层发育程度的相关统计分析,采用自组织模糊神经网络综合预测方法^[6-7]对研究区古岩溶储层的分布开展了分层预测。结果表明:第一套储层(表层岩溶带)在轮西地区整体发育比较好(图4(a));第二套储层(上部潜流带)主要分布在lg15-1、lg52井一线以西和lg9断裂带附近,呈北东向条带状展布(图4(b));第三套储层(下部潜流带)则主要发育在lg15-1、lg52井一线以西,在lg40和lg9附近,lg41井东南呈局部分布(图4(c));蓬莱坝组内部古岩溶储层相对不发育(图4(d))。图4中右侧的数值指示岩溶储层的发育程度的相对大小,其中0~0.4代表岩溶储层不发育,0.4~0.6发育程度较差,0.6~0.8发育程度中等,大于0.8岩溶储层最为发育。

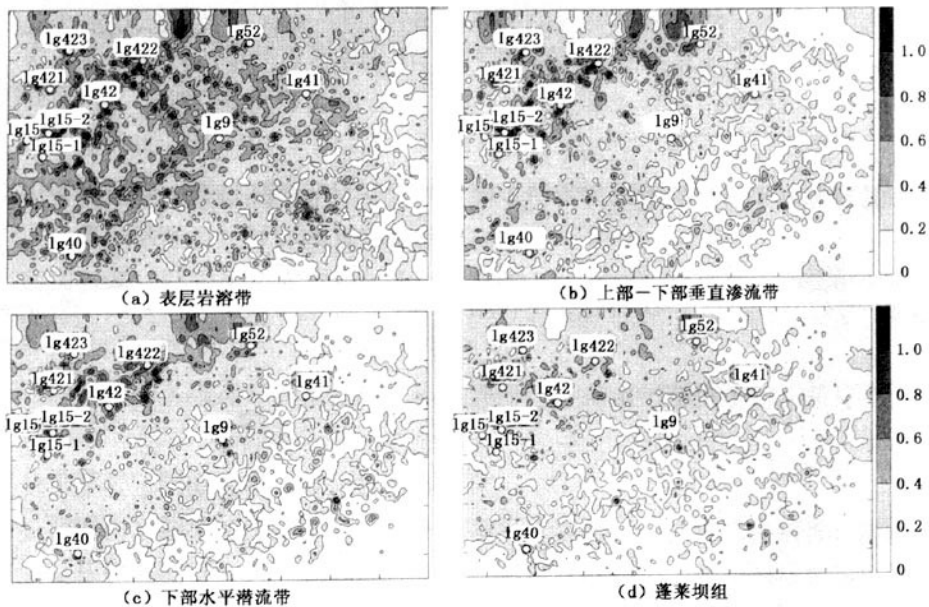


图4 轮西区块古岩溶储层发育程度预测

Fig. 2 Paleokarst reservoir development level forecast in Lunxi block

3.5 预测效果

从预测结果来看,轮西地区古岩溶储层的展布具有非常明显规律性:一是自南东向北西岩溶化程度具有增加的趋势,即峰林谷地和峰林平原区岩溶要比峰丛洼地地区发育;二是岩溶作用平面上分布具有分带性,垂向上具有叠置性的分布特点。说明岩溶的发育主要受岩溶古地貌和断裂系统的控制。

从实际钻探结果来看,lg422井和lg52井均钻遇到良好的储层,其中lg422井钻遇2套大型洞穴,属一类岩溶发育区,lg52井以裂缝-孔洞型的二类储层为主,lg9—lg41井区位于峰丛洼地地区,岩溶化程度低,与储层预测结果也极为吻合。特别是利用储层预测成果在lg40井北部部署的lg54井也钻遇到了小型溶洞十分发育的豹皮灰岩储层,获得了勘探评价上的成功,进一步证实了预测结果的正确性。

4 结论与认识

(1)在轮西地区,由于受早海西运动的影响以及鹰山组高溶解度的生屑灰岩的控制,在奥陶系风化壳中发育两个岩溶旋回,纵向上形成了3套与洞穴有关的古岩溶储层,分别为表层岩溶带裂缝及小型洞穴型储层、上部旋回的潜流岩溶带与小-中型洞穴有关的储层、下部旋回潜流岩溶带与大型洞穴有关的储层。

(2)平均反射强度、均方根振幅、平均能量是反映碳酸盐岩古岩溶缝洞型储层的敏感性地震属性参数,而能量半衰时斜率是检测碳酸盐岩风化壳裂缝发育带敏感型参数。

(3)轮西地区古奥陶系风化壳古岩溶储层的发育主要受岩溶地貌和断裂的控制,平面上具有良好的分带性,垂向上具有较好的叠置性。

(3)以地质概念模型的建立和敏感性参数分析为基础,通过合理划分地震时窗和属性提取,从井资料出发,采用合理的综合预测方法,是开展古岩溶储层预测,提高碳酸盐古岩风化壳油藏勘探成功率的关键。

参考文献:

- [1] 蓝江华. 四川盆地大池干井构造带石炭系古岩溶储层成因模式[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(1): 23-27.
- LAN Jiang-hua. The genetic model of paleosolution controlled reservoir of carboniferous system in the Dachiganjing tectonic belt, Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(1): 23-27.
- [2] 邬长武, 龚福华, 魏建新, 等. 地震物理正演模拟在古岩溶储层研究中的应用[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 74-76.
- WU Chang-wu, GONG Fu-hua, WEI Jian-xin, et al. Application of seismic physical forward modeling in palaeo-

- okarst reservoir study[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004,26(4):74-76.
- [3] 魏建新,狄邦让,王立华. 孔洞储层地震物理模拟研究[J]. 石油物探,2008,47(2):156-160.
WEI Jian-xin, DI Bang-rang, WANG Li-hua. Seismic physical modeling of cavern reservoir [J]. Petroleum physical exploration, 2008,47(2):156-160.
- [4] 王永刚,乐友喜,刘伟,等. 地震属性与储层特征的相关性研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(1):26-30.
WANG Yong-gang, YUE You-xi, LIU Wei, et al. Relativity between seismic attributes and reservoir characters [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004,28(1):26-30.
- [5] 莫午零,吴朝东. 碳酸盐岩风化壳储层的地球物理预测方法[J]. 北京大学学报:自然科学版,2006,42(6):704-707.
MO Wu-ling, WU Chao-dong. Geophysical method for prediction of weathering crust of carbonate reservoirs[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2006,42(6):704-707.
- [6] 刘忠宝,孙华,于炳松,等. 裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制[J]. 新疆石油地质,2007,28(3):289-291.
LIU Zhong-bao, SUN Hua, YU Bing-song, et al. The control of fractures on karst in Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007,28(3):289-291.
- [7] 陈新军,蔡希源,纪友亮,等. 塔中奥陶系大型不整合面与风化壳岩溶发育[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(8):1122-1127.
CHEN Xin-jun, CAI Xi-yuan, JI You-liang, et al. Relationship between large scale unconformity surface and weathering crust Karst of Ordovician in Tazhong [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007,35(8):1122-1127.
- [8] 朱如凯,郭宏莉,高志勇,等. 中国海相储层分布特征与形成主控因素[J]. 科学通报,2007,52(增刊1):40-45.
ZHU Ru-kai, GUO Hong-li, GAO Zhi-yong, et al. The distribution character and the formation controlling factors of marine reservoir in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007,52(supl):40-45.
- [9] 王宏语,樊太亮,高志前,等. 塔中地区奥陶纪古地貌及其对储集层的控制作用[J]. 新疆石油地质,2007,28(1):15-19.
WANG Hong-yu, FAN Tai-liang, GAO Zhi-qian, et al. Ordovician Palaeogeomorphology and reservoir-controlled process in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007,28(1):15-19.
- [10] 热合木江,马玉书. 模糊神经网络在地质数据分析中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,1996,20(6):13-16.
REHE Mu-jiang, MA Yu-shu, Analysis of geological data by using fuzzy neural networks[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1996,20(6):13-16.

(编辑 徐会永)

(上接第15页)

- [5] 刘顺生,胡复唐. 洪积扇砾岩储层非均质性及非均质模型[J]. 新疆石油地质,1993,14(4):350-356.
LIU Shun-sheng, HU Fu-tang. Heterogeneity and heterogeneity models of pluvial conglomerate reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1993,14(4):350-356.
- [6] 岳大力,吴胜和,刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报,2007,28(4):99-103.
YUE Da-li, WU Sheng-he, LIU Jian-min. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river [J]. Acta Petroleoi Sinica, 2007,28(4):99-103.
- [7] 周银邦,吴胜和,岳大力,等. 点坝内部侧积层倾角控制因素分析及识别方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(2):7-13.
ZHOU Yin-bang, WU Sheng-he, YUE Da-li, et al. Controlling factor analysis and identification method of lateral accretion shale beddings angle in point bar [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(2):7-13.
- [8] 岳大力,吴胜和,程会明,等. 基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):21-28.
YUE Da-li, WU Sheng-he, CHENG Hui-ming, et al. Numerical reservoir simulation and remaining oil distribution patterns based on 3D reservoir architecture model [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):21-28.

(编辑 徐会永)