

文章编号:0253-9985(2011)04-0489-10

海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测

何治亮¹,魏修成¹,钱一雄¹,鲍征宇²,范明¹,焦存礼¹,彭守涛¹,陈冬¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国地质大学,湖北 武汉 430074)

摘要:针对碳酸盐岩储层具有易溶蚀、易充填和成因、演化复杂的特点,以塔里木盆地寒武系-奥陶系、川东北二叠系-三叠系为主要对象,开展了环境描述、形成机理、发育模式和分布预测的研究,取得了以下三方面的认识。①不同条件下碳酸盐岩溶蚀能力对比实验表明,不同岩性、岩石结构、流体介质、添加物加入在开放与封闭状态下,碳酸盐岩溶蚀行为差异很大,但基本上遵循碳酸盐岩溶解—沉淀的“溶蚀窗”规律。②碳酸盐岩储层总体上受控于环境与地质作用过程两大条件。通过对不同类型储集体“五因素”(构造、地层、岩相、流体、时间)的剖析,表明不同地区和层系的储层分别具有各自特有的成因特点、主控因素和分布规律。③海相碳酸盐岩储层预测面临复杂地表—构造、埋深大、形态复杂、非均质性强等不利条件,通过“以岩石物理分析为基础,提高地震资料处理技术水平,利用井—震结合,厘清不同类型碳酸盐岩储层地质特征和地球物理响应特征,建立碳酸盐岩储层的地球物理响应模式,分析其非线性特征,揭示储层内部的不连续性、不规则性,定量计算储层物性和含油气性”技术路线的实施,可以有效预测优质碳酸盐岩储层的空间分布。

关键词:岩溶储层;白云岩储层;礁滩储层;成因机理;碳酸盐岩;塔里木盆地;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Forming mechanism and distribution prediction of quality
marine carbonate reservoirsHe Zhiliang¹, Wei Xiucheng¹, Qian Yixiong¹, Bao Zhengyu², Fan Ming¹, Jiao Cunli¹,
Peng Shoutao¹ and Chen Dong¹

(1. SINOPEC Research Institute of Exploration & Production, Beijing 100083, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Marine carbonate reservoirs are characterized by high propensity for dissolution and filling and complexity of genesis and evolution. We performed description of sedimentary environment, study of forming mechanism and development models, and prediction of distribution of carbonate reservoirs in the Cambrian-Ordovician in Tarim Basin and the Permian-Triassic in Northeastern Sichuan Basin, and came to the following three conclusions. First, the behaviors of carbonates dissolution are quite different depending on lithologies, structures, fluids and fillings as well as the system being open or closed. However, they still obey the law of “dissolution window”. Secondly, carbonate reservoirs are principally controlled by sedimentary environment and diagenetic process. Analysis of five influential factors including structures, stratigraphy, lithofacies, fluids and forming time shows that reservoirs in different areas and different layers are different in genesis, controlling factors and distributing characteristics. Thirdly, the geophysical prediction for carbonate reservoirs are confronted with complex surface conditions, complicated structures, great burial depth, complicated geometry and strong heterogeneity. However, the spatial distribution of high-quality carbonate reservoirs can be predicted effectively by utilizing the integrated predicting methods including petrophysical characteristic analysis of logging data, processing of high-resolution 3-D seismic data, calibration of seismic data with well data, differentiation of geological and geophysi-

收稿日期:2011-06-01。

第一作者简介:何治亮(1963—),男,博士,教授级高级工程师,油气地质。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB422100);国家科技重大专项(2008ZX05-005-002)。

cal characteristics of different types of reservoirs, construction of the model of the geophysical response to carbonate reservoirs, demonstration of the discontinuity and irregularity of reservoirs, as well as quantitative calculation of the physical parameters and the hydrocarbon potential of carbonate reservoirs.

Key words: karst reservoir, dolomite reservoir, reef-bank reservoir, forming mechanism, carbonates, rock, Tarim Basin, Sichuan Basin

中国海相碳酸盐岩分布广、厚度大、岩石类型多,但由于地质条件复杂,优质碳酸盐岩储层发育与分布是制约油气勘探开发的重要瓶颈之一。面对国家油气供需缺口不断增大的严峻形势,国家科技部于 2005 年批准了“973”计划《中国海相碳酸盐岩层系油气富集机理与分布预测》项目(2005CB422100)。其中,03 课题(中国海相碳酸盐岩层系多种储层形成机理与分布模式)、04 课题(中国海相碳酸盐岩层系深层储集层地球物理判识)围绕海相碳酸盐岩储层形成机理、预测方法开展了系统研究。

研究工作针对我国碳酸盐岩储层类型多样、后期改造强烈、深埋藏后优质储层形成与保存机制复杂,不易预测的实际难题,抓住碳酸盐岩储层形成过程中多期次、多成因溶蚀—充填作用复合叠加机理与分布预测这一核心问题,选择塔里木盆地和四川盆地这两个既有复杂叠合盆地共性又有构造演化个性的盆地剖析,拟定 3 个主攻方向:①深层优质白云岩储层形成机理;②碳酸盐岩多期次、多成因溶蚀—充填作用复合叠加机理及岩溶储层评价预测;③碳酸盐岩储层的时空分布模式、预测模型和预测技术。

基于对前人工作和储层发育的区域地质背景详细的分析,按照多旋回叠合盆地碳酸盐岩储层成因的多因素联合和多阶段复合的总体思路,以碳酸盐岩储层“建造与改造,溶蚀与充填”的动态演化过程为主线,强调地质—地球化学—地球物理相结合的基本方法。其中,地质分析总结成因模式,地球化学阐释溶蚀机理,地球物理建立预测方法。形成了如下技术路线:在分析碳酸盐岩储层发育的构造和沉积背景的基础上,开展孔隙流体运动学和水—岩相互作用分析,揭示碳酸盐岩储层发育多样性和非均一性的形成机理,建立碳酸盐岩储层发育模式和预测模型,形成有效储层的地球物理判识方法(图 1)。

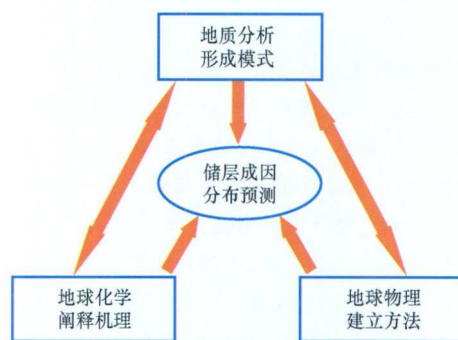


图 1 碳酸盐岩储层研究思路

Fig. 1 Schematic illustration of research approaches for carbonate reservoirs

五年来,围绕上述技术路线,基于由产、学、研、构建的研究队伍,主要取得了三大方面的研究进展,可以概括为“揭示了不同岩石—流体相互作用的部分机理,总结了五因素控储的概念模式,形成了几类碳酸盐岩储层的综合预测技术”。

1 碳酸盐岩溶蚀机理与地质解释

早在 20 世纪 70 年代,国外就开展了碳酸盐岩的溶解动力学实验^[1],不同学者相继模拟了不同流体介质、不同温压条件下、不同成分和粒级的碳酸盐岩矿物溶解过程,但不同学者对实验边界条件设计不同,对结果的解释和规律的总结也不尽相同^[2-6]。杨俊杰等据在表生到埋藏成岩作用的温压条件(40 ~ 100℃, 1 ~ 25 MPa)下溶蚀模拟发现,方解石、白云石在不同温压条件下存在差异溶蚀^[2];刘再华等应用“DBL”(扩散边界层)理论模型,强调了流体流速对方解石溶解和沉淀速率的显著控制^[3];Alkattan 和 Gautelier 等人相继应用圆盘实验,研究了方解石和石灰岩在温度 25 ~ 80℃,流体 pH 值为 -1 ~ 4 条件下的溶解动力学特征,并拟合出溶解速率方程^[4-5];唐健生等人在塔里木盆地西北缘采用灰岩和白云岩溶蚀试片

进行了野外溶蚀实验研究,认识到降水下渗溶滤对岩溶孔、缝、洞的形成起到重要作用^[6]。

本次研究采用了先进的水岩反应实验装置,一是利用旋转盘进行了高温、高压流动体系下储层固-液反应动力学的实验,二是利用固液反应——垂扫干涉仪实时观测和测量固液反应的微观动力学过程。选用塔里木盆地、川东北碳酸盐岩样品,通过改变温压、流体介质、固液相态及基质(添加物)等因素模拟在表生及埋藏条件下碳酸盐岩的溶蚀-沉淀作用过程,建立了碳酸盐岩溶蚀模拟实验流程,揭示了碳酸盐岩在升、降温条件下溶解-沉淀的“溶蚀窗”规律。

实验结果表明,①不同的岩性溶解度差异很大,灰岩中方解石含量越高,杂质含量越少,溶解速率越大;而白云岩中含有一定量杂质(如石英、长石等)有利于白云岩的溶蚀;受表面积物理行为影响,溶解速率与颗粒粒径之间呈反比关系,即粒径越小,溶解越快;②不同的流体介质溶蚀温度最大值不同,如在 CO_2 水溶液、乙酸水溶液、 H_2S 水溶液中的碳酸盐岩最大溶蚀量所处的温度分别为75,90,130~150℃;③不同的体系下最大溶蚀量对应的温度不同,如开放非平衡态乙酸溶液中,最大溶蚀量对应温度为90℃;而封闭平衡态乙酸溶液中最大溶蚀量对应温度为160℃;④不同的添加物对溶蚀作用影响不一样,若溶液中加入石膏(CaSO_4),明显促进了白云岩溶蚀,这就是与膏岩伴生的白云岩易发育较好的储层的原因之一;而地层孔隙中的原油充注具有双重作用,既抑制了胶结,也抑制了溶解;⑤白云岩化鲕粒灰岩中更容易溶蚀形成次生粒间、粒内孔隙和微孔隙;⑥压力对碳酸盐岩的溶解速率的影响比较复杂,总的来说压力对碳酸盐岩溶解的影响是通过影响地质流体中的离子浓度,间接产生作用。

碳酸盐岩流体-岩石溶蚀机理可以进一步阐释为以下特点:①在盆地经历复杂的地质演化历程中,随着沉降埋藏与隆升,温度压力或成岩流体发生改变,碳酸盐岩的溶解-沉淀作用贯穿于整个成岩演化过程,是可逆的;②不同碳酸盐岩(矿物-岩石)溶蚀-沉淀的“溶蚀窗”的特征不同,在 CO_2 溶液中,灰岩的溶解高峰温度为60~90℃、白云岩溶解高峰温度为120~160℃,前者溶蚀强度明显大于后者;③成岩体系的开放-封闭状态以及介质、温压条件的差异决定了“溶蚀窗”发育的埋深

不同,在相同地温(梯度)下, CO_2 最浅、乙酸其次、 H_2S 最深。在同样的流体作用下,封闭状态下的“溶蚀窗”深度明显大于开放状态;④只有处于特定的温压、介质条件即“溶蚀窗”中的储层才能形成并保持储集空间。分析表明,普光气田、靖边气田、塔河油田的碳酸盐岩储层现今均处于特定的“溶蚀窗”内,使不同地质成因形成的储集空间得以较好地保存。

2 “五因素”控储的概念模型

影响碳酸盐岩储层发育与分布的因素很多。已有学者分别从沉积^[7-8]和成岩后生变化^[9-15]两大方面进行过分析和总结。在塔里木盆地塔河油田奥陶系岩溶型储层和四川盆地川东北地区普光气田二叠系-三叠系礁滩型储层研究过程中,从不同构造背景、沉积环境、地层结构、温压条件、地层流体及成岩演化等多角度对优质储层形成与分布的控制,提出了较多重要的思路与观点^[16-20]。如马永生等根据对普光气田优质碳酸盐岩储层发育的主控因素分析,提出沉积成岩环境控制早期孔隙发育、构造压力耦合控制裂缝与溶蚀、流体岩石相互作用控制深部溶蚀与孔隙保存的“三元控储”机理^[16]。

对塔河、塔中和川东北地区典型碳酸盐岩储层实例分析表明,碳酸盐岩储层的形成总体上受控于成岩环境与地质作用过程,即构造、地层、岩相、流体和时间;不同类型盆地、不同构造区带、不同沉积层系环境不同,所经历的地质演化史迥异,使碳酸盐岩储层的成因类型和发育状况呈现出强烈的非均质性。按照“构造、地层、岩相、流体、时间”五因素分别对研究对象剖析,系统地总结其成因特点和分布规律,可实现对不同地区和层系储层的有效评价与预测(图2)。

构造因素包括控制沉积盆地的构造原型和控制变形的后期改造。不同的板块构造环境下的原型盆地类型控制了碳酸盐岩地层沉积发育的差异性,不同大地构造阶段控制了建造及岩相组合。伸展、聚敛和转换—走滑板块体制控制了盆地组合、沉积成岩环境。同沉积构造所控制的地貌对碳酸盐岩沉积体系的发育与分布均有明显的影响。后期的改造变形决定了盆地内的构造样式、应力场和流体类型,对碳酸盐岩储层的形成与保持均有重要影响。

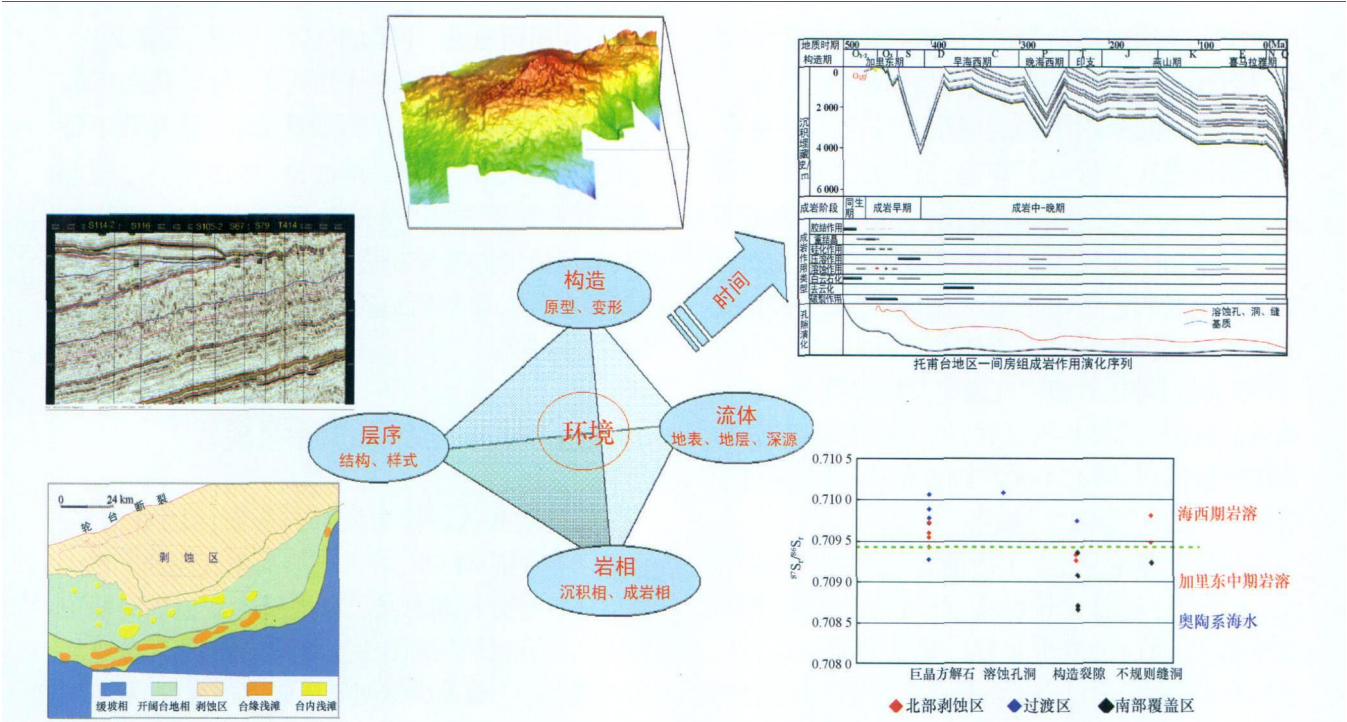


图 2 “五因素”控储的概念模型

Fig. 2 The conceptual model of the five factors controlling reservoir formation

层序因素包括层序结构与层序样式。确定不同级别和类型的不整合面发育与分布是描述层序的关键,这些不整合面所代表的地质事件深刻地影响了碳酸盐岩储层特别是岩溶型储层的形成。受盆地类型、古地形、气候和海(湖)平面变化所控制的层序样式,包括体系域的组成、加积、退积、进积等组合方式,对碳酸盐岩的发育、储集空间的形成都具有决定性的影响。

岩相因素包括沉积相和成岩相。岩石成分与结构类型、高能相带和合适的成岩环境控制优质储层的发育分布,已为前人大量的研究所证实^[21-22]。

流体因素包括海水、大气淡水、成岩/成烃流体和深源热液。在碳酸盐岩建造与改造过程中,流体作用贯穿始终。地层中酸性流体的形成和温、压环境的改变决定了标准自由能(ΔG)的差异,进而控制了碳酸盐岩矿物的溶蚀-沉淀以及相互转化的过程。在同一地层和不同地层间流体的运动和流体所含物质水-岩相互作用的过程,同时也是碳酸盐岩储集空间的形成或致密化的过程。

时间因素是碳酸盐岩储层形成与保持的最重要因素之一。碳酸盐岩储集空间的演化过程贯穿

于整个地质演化过程中,受构造应力场、地温场、流体化学场演化所控制,与“五史”(构造演化史、埋藏史、热史、生烃史、成岩史)相伴生的孔隙演化史是各种储集空间形成的建设性作用与破坏性作用此消彼长的具体表现。其中,建设性作用包括溶蚀、白云岩化、构造破裂、压溶、重结晶作用等;破坏性作用包括各种胶结、膏化、硅化、压实、沉积充填作用等。不同类型的碳酸盐岩储层分别受控于这五种因素,但主控因素各不相同。

2.1 优质表生岩溶储层机理

以塔河地区奥陶系为例。从 20 世纪 90 年代起,一批学者对塔河油田岩溶型储层形成机理和分布规律进行研究^[14-15,23-26],已充分认识到控制优质储层形成的地质因素是多样的,其形成是多期的。通过丰富的勘探开发第一手资料的分析,按五因素控储的思路认为长期存在的古隆起和多期形成的断裂体系是有利的构造因素;多期抬升剥蚀形成的复合不整合是有利的地层因素;开阔台地相成因的厚层块状纯净的灰岩是有利的岩相因素;长期暴露接受大气降水和海岸混合水的溶蚀,后期埋藏叠加酸性流体的进一步溶蚀构成了有利的流体因素。由于塔河油田早期处于有利的

岩溶斜坡部位,岩溶终止于青壮年期,形成了良好的储集空间。尽管早期经历了不同程度的物理和化学充填,后期还经历了重力垮塌和化学胶结作用,但储集空间总体得以较好保存。特别是印支期—燕山期后持续深埋和地层中酸性流体的存在,提供了储集空间良好的保持环境。值得指出的是,塔河油田奥陶系储层存在时空发育明显的差异性,通过大量翔实资料的剖析,提出塔河北部多期不整合叠加区优质岩溶储层发育受控于多期表生岩溶的“复合效应”;南部地区暴露时间短,有利储层形成受控于有利相带、古地貌、断裂—裂缝等多因素有效匹配的“联合效应”。详细成果报道见相关论文^[27]。

2.2 深层优质白云岩储层形成与保存机理

以塔里木盆地寒武系一下奥陶统为例。深层白云岩储层一直是广泛关注的研究领域。近期国内外关于白云岩储层的研究主要包括白云岩成因机理、孔隙类型及演化、地球化学模拟、成岩环境等^[28-29],国内学者在与古岩溶、礁滩有关的白云岩储层研究上取得了突出的成果^[30-31]。塔里木盆地寒武系一下奥陶统发育巨厚的白云岩,大部分为致密的非储层。前人对塔里木盆地寒武系和下奥陶统白云岩岩石类型曾进行过多种分类^[32-33]。本次研究认为,塔里木盆地寒武系一下奥陶统碳酸盐岩主体为一大型碳酸盐开阔台地,其中寒武系白云岩主要发育开阔台地、局限台地和蒸发台地亚相。寒武系—奥陶系白云岩可细分为泥—粉晶白云岩、粉—细晶白云岩、中—粗晶白云岩、斑状白云岩、叠层石白云岩和角砾白云岩6种类型。对应的白云岩储集体主要有溶蚀孔隙型储层、溶蚀孔隙—孔洞型储层、溶蚀孔洞型储层、岩溶缝—(孔)洞型储层、溶蚀孔隙—(孔洞)—缝型储层、岩溶洞穴型等多种。通过对部分典型钻井和露头中相对优质白云岩储层的解剖,按五因素控储的思路总结如下:隆起、斜坡都是有利的构造类型,但多期形成的高角度的走滑—伸展断裂体系是必备的构造因素;不同类型不整合面所代表的暴露时间和剥蚀强度与储层发育密切相关,进积和加积的层序样式有利储层形成;高能相带和准同生期、热液白云岩化是有利的岩相因素;暴露大气降水和深埋酸性流体是有利的流体因素。

在这些因素中,断裂和晚期深埋热液作用是优质白云岩储层形成和保持的关键控制因素。根据不同地区多期叠加隆升剥蚀不整合、断层、沉积相带、优质盖层和相关的热液溶蚀作用等机制综合分析,可将塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩储层概括为“断隆—不整合”、“断坡—礁滩相”和“断盖—台内”3种白云岩储层成因模式。详细成果报道见相关论文^[34]。

2.3 礁滩型储层成因机理

以川东北地区上二叠统一下三叠统为例。继普光气田发现后,勘探家们沿着长兴组沉积期梁平—开江陆棚两侧寻找新的目标,先后发现了元坝、龙岗、兴隆等气田。川东北地区上二叠统一下三叠统碳酸盐岩优质储层的形成也是五种控制因素联合作用的结果。①构造,中二叠世的“峨嵋地裂运动”形成了多个台间、台内裂谷,垒—堑相间的古地貌控制的沉积格局,印支期以来,特别是燕山中期,挤压破裂对优质储层的形成具有积极的作用。②地层层序,三级及以上高频层序界面与早期暴露溶蚀是优质储层发育的基础,海平面升降、古地貌以及早期同生期断裂决定了加积、进积等层序样式,控制了储层的分布。③岩相,沿开江—梁平陆棚周缘分布的台缘高能相带和白云岩化作用奠定了优质储层发育的物质基础。④流体,川东北上二叠统一下三叠统沉积后发育了早、中、晚3期酸性流体,第一期以大气淡水为主,储集空间以鲕模孔和鲕粒内溶孔溶洞为主;第二期在有机质生烃出现的有机酸作用下,形成晶间溶孔及各种溶孔,随后被沥青充填;第三期在TSR作用下,形成大量非选择性溶孔,大部份未被充填。⑤时间,该地区经历了燕山晚期之前的逐渐深埋与后期缓慢抬升剥蚀的过程,总体处于“溶蚀窗”内,储集空间形成与发育后被很好地保存。

“开江—梁平陆棚”是一个不对称的台内凹陷。其东北侧地形坡度相对更陡,以普光地区为代表,表现为陡坡型垂向加积沉积模式,储层厚度更大,但分布面积相对较小。西南侧地形坡度相对较缓,以元坝地区为代表,表现为缓坡型侧向进积模式,储层分布广,类型多,但厚度明显变薄。元坝和普光两个地区所经历的沉积、成岩作用方

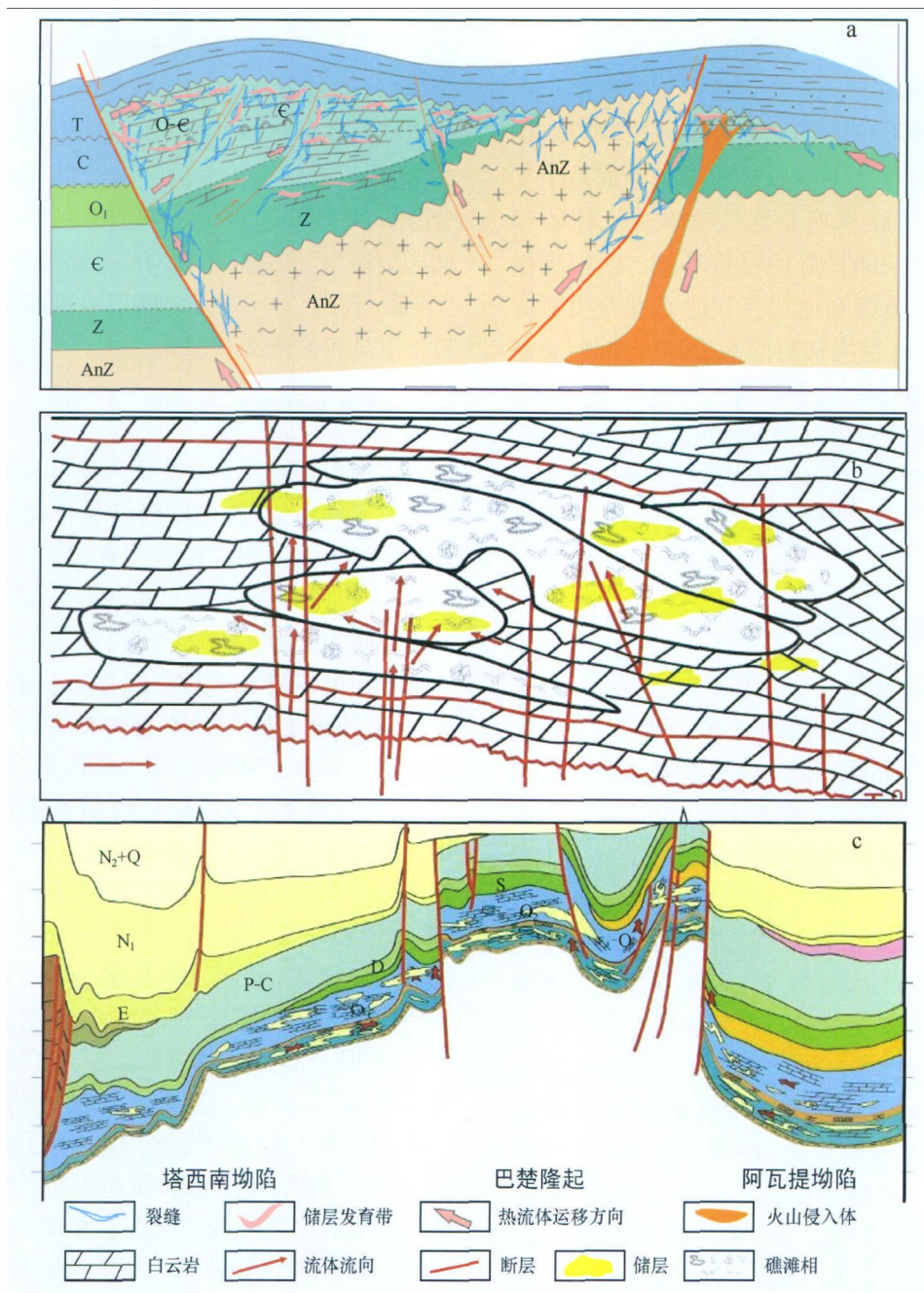


图 3 塔里木盆地优质白云岩储层成因模式

Fig. 3 Genetic models of high-quality dolomite reservoirs in Tarim Basin

a. 断隆-不整合模式; b. 断坡-台缘模式; c. 断盖-台内模式

式总体相似,但程度不一,在控制储层形成的三大主控因素中存在明显差异。其表现为:①白云岩化作用,前者碳酸盐岩选择性白云岩化,生屑结构保存好,后期改造弱;后者白云岩化普遍,且受埋藏期的改造明显,呈中粗晶;②溶蚀作用,前者表现为晚期溶蚀为主,早期溶蚀铸模孔欠发育;后者发育早期溶蚀生物体腔孔及风化残积结构,且晚期溶蚀强烈;③破裂作用,前者地区岩心及薄片均见裂缝,但相对普光而言,总体欠发育。

此外,元坝总体为一大型低缓负向构造,断裂不发育,晚期酸性流体对储层的改造弱。因此,元坝二叠系长兴组建设性成岩作用逊于普光,故储层物性相对差。

3 碳酸盐岩储层预测方法

储层预测一直是油气勘探的关键。经过长达 50 多年,特别是近 20 年的不断探索和实践,储层

预测技术已形成一套相对完备的技术方法。地震正、反演技术日趋成熟,地震多属性分析技术逐渐完善,特别是多波、多分量技术以及四维地震、叠前叠后反演、谱分解技术等新技术的出现为储层预测注入了新的血液^[35-37]。目前技术发展的焦点主要集中于地震储层预测精度,地震、测井、地质和工程等多信息融合、多方法综合;运用多种数学、软件工具进行可视化描述;以及复杂储层的数学模型模拟和物理模型实验。

针对碳酸盐岩储层预测面临复杂地表-构造、埋深大、形态复杂、非均质性强等不利条件,本次研究特色体现在:①将仅适于简单地表条件固定基准面叠前深度偏移方法拓展到适应山地复杂地表条件的浮动基准面;②将各向同性介质叠前成像技术拓展到各向异性介质中;③将单纯依靠反射波场的储层预测拓展到综合利用反射波场和绕射波场信息来预测储层及其非均质性。总而言之,通过算法改进,进一步提高地震属性预测储层的精度与可信度。以不同类型碳酸盐岩储层的非均质性为主线,利用井-震结合厘清不同类型碳酸盐岩储层地质特征和地球物理响应特征,建立碳酸盐岩储层的地球物理响应模式,分析其非线性特征,揭示储层内部的不连续性和不规则性,建立不同类型的储层模型并进行正演模拟,进而定量预测储层的物性和含油气性。

岩溶缝洞、礁滩、白云岩3种类型储层的主要预测方法分别阐述如下。

3.1 岩溶缝洞型储层预测

裂缝物理模拟结果表明,反射波在通过裂缝体后呈现出方位各向异性特征。裂缝张开度减小,方位各向异性程度减弱;当裂缝介质近乎刚性体,不呈现方位各向异性特征。孔洞物理模拟正演分析表明:①在非涅尔带以内,绕射波能量随溶洞尺度增加而递增;②道间距越小,溶洞区分度越高;③地震波传播受小尺寸的非均匀介质的多次散射影响,使与频率和入射角有关的地震波衰减,并对速度产生影响;④在第一菲涅尔带内,溶洞产生绕射,绕射点与上、下层较大波阻面之间产生层间多次反射波。利用随机介质变网格有限差分数值模拟方法对随机孔洞的地震响应正演,大尺度溶洞反射清晰,小尺度溶洞反射由于散射造成高频能量相对强。根据正演结果,对塔河主体区孔洞型储层进行了地震预测,溶洞在地震剖面上表征为反射振幅异常和反射结构的变化。

3.2 礁滩复合体储层预测

根据三叠系飞仙关组鲕滩储层与二叠系长兴组生物礁储层的实际地质剖面,建立相应的地质-地球物理模型并进行正演模拟。正演剖面显

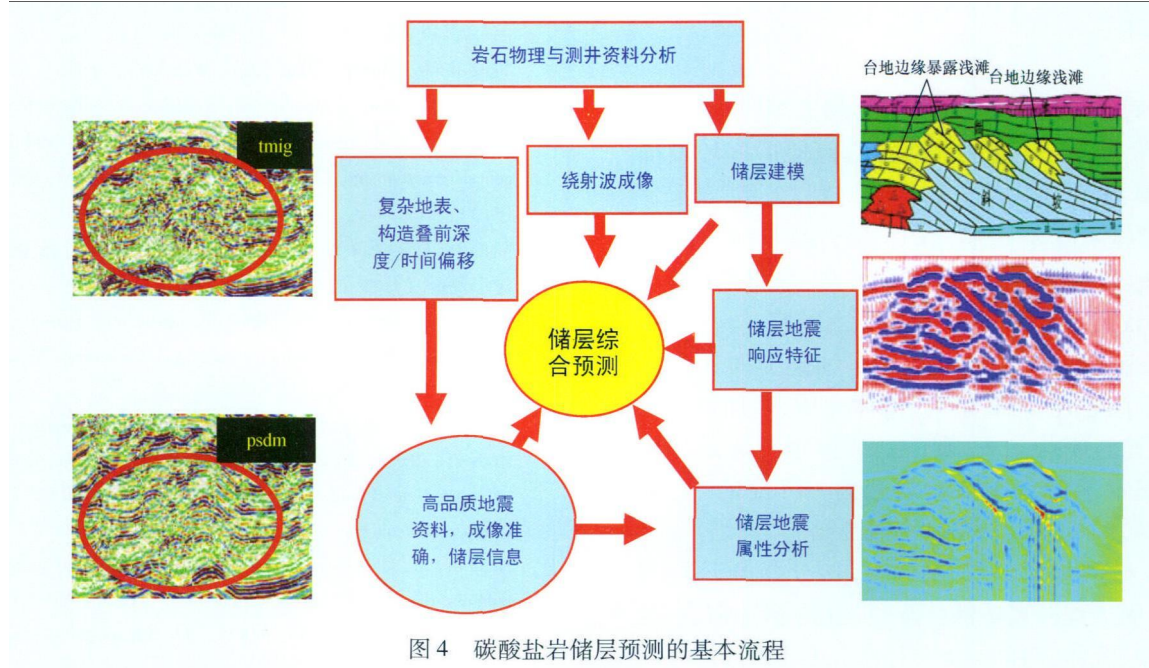


图4 碳酸盐岩储层预测的基本流程

Fig. 4 The basic workflow for geological-geophysical prediction of carbonate reservoirs

tmig. 时间偏移剖面;psdm. 叠前深度偏移剖面

示:①单个的鲕粒滩或生物礁难以识别,但整体可较好识别;②鲕粒滩内部的地震反射比生物礁更为杂乱,但二者边界反射类似;③使用高频地震子波计算的地震记录对滩、礁结构分辨更清楚,但能量较弱。对正演剖面各种属性分析表明,时域能量和瞬时振幅、瞬时相位属性对鲕粒滩的反映比较敏感,不同地震属性可以反映不同部位的储层发育特征。

3.3 薄层白云岩储层预测

对通南巴地区石炭系黄龙组白云岩的地震响应正演模拟,发现储层预测的关键是对底界面反射波同相轴的分析。白云岩储层在同相轴上常发生中断或扭曲。通过建立多组变参数白云岩储层模型,模拟黄龙组中白云岩厚度的变化。正演模拟表明黄龙组白云岩地震波场有如下特征:①黄龙组厚度影响其底界面反射波,对白云岩的地震波场也有明显影响,且反射波受白云岩储层影响明显;②含油气后白云岩储层容易分辨,反之,不含油气的白云岩储层难以识别;③通过对正演剖面地震属性分析,表明波阻抗反演能明显改善对白云岩的识别,而频率属性对流体识别比较有效,振幅和能量属性分析则起辅助作用,而AVO的作用还需进一步研究。

4 结论

针对碳酸盐岩储层易溶蚀、易充填、成因与演化复杂的特点,通过系统地开展储层形成环境描述、机理、发育模式及分布预测研究,采用“建造-改造,溶蚀-充填”为主线的思路,探索地质-地球物理-地球化学相结合的研究方法,取得了以下3方面的认识。

1) 不同条件下碳酸盐岩溶蚀能力对比实验表明,不同岩性、岩石结构、流体介质、添加物加入在开放与封闭状态下,碳酸盐岩溶蚀行为差异很大,但基本上遵循碳酸盐岩溶解-沉淀的“溶蚀窗”规律。

2) 碳酸盐岩储层总体上受控于沉积环境与地质作用过程两大条件。按照“五因素”(构造、地层、岩相、流体、时间)分别对研究对象剖析,可以总结其成因特点和分布规律,实现对不同地区和层系储集体有效评价与分布预测。

3) 海相碳酸盐岩储层预测面临复杂地表一构造、埋深大、形态复杂、非均质性强等不利条件,通过“以岩石物理分析为基础,提高地震资料处理技术水平,利用井-震结合,厘清不同类型碳酸盐岩储层地质特征和地球物理响应特征,建立碳酸盐岩储层的地球物理响应模式,分析其非线性特征,揭示储层内部的不连续性、不规则性,定量计算储层物性和含油气性”技术路线的实施,可以有效预测优质碳酸盐岩储层的空间分布。

致谢:本项工作由中国石化石油勘探开发研究院、中国石化西北油田分公司、中国石化石油物探技术研究院、中国地质大学(武汉、北京)、成都理工大学、南京大学、中国科学院地质地球物理研究所等数十位中青年科研工作者共同完成,参加研究工作的还有樊太亮、杨长春、胡文瑄、朱井泉、于炳松、张涛、夏东领、刘伟新、邬兴威、龙胜祥、吴世祥、李宏涛、杨江峰、高志前、尤东华、邢秀娟等,实施过程中得到了中国石化总部、西北、南方、西南、华北分公司的大力支持,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Plummer L N, Wigley T M L, Parkhurst D L. Critical review of the kinetics of calcite dissolution and precipitation [C]// Jenne E A. ACS Symposium Series, 1979: 493-537.
- [2] 杨俊杰, 黄思静, 张文正, 等. 表生和埋藏成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实验模拟[J]. 沉积学报, 1995, 13(3): 49-54.
Yang Junjie, Huang Sijing, Zhang Wenzheng, et al. Experimental simulation of dissolution for carbonate with different composition under the conditions from epigenesis to burial diagenesis environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(3): 49-54.
- [3] 刘再华, Dreybrodt W. DBL理论模型及方解石溶解、沉积速率预报[J]. 中国岩溶, 1998, 17(1): 1-7.
Liu Zaihua, Dreybrodt W. The DBL model and prediction of calcite dissolution/precipitation rates[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(1): 1-7.
- [4] Alkattan M, Oelkers E H, Dandurand J L. An experimental study of calcite and limestone dissolution rates as a function of pH from 1 to 3 and temperature from 25°C to 80°C [J]. Chemistry Geology, 1998, 151: 199-214.
- [5] Gautelier M, Oelkers E H, Schott J. An experimental study of dolomite dissolution rates as a function of pH from -0.5 to 5 and temperature from 25°C to 80°C [J]. Chemistry Geology, 1999, 157: 13-26.
- [6] 唐健生, 夏日元, 邹胜章, 等. 塔里木盆地西北缘野外溶蚀试验研究[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 234-237.

- Tang Jiansheng, Xia Riyuan, Zou Shengzhang, et al. Experimental study on the field corrosion on the northwest verge of Tarim Basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(3): 234–237.
- [7] 顾家裕, 张兴阳, 罗平, 等. 塔里木盆地奥陶系台地边缘生物礁、滩发育特征[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 277–283.
- Gu Jiayu, Zhang Xingyang, Luo Ping, et al. Development characteristics of organic reef-bank complex on Ordovician carbonate platform margin in Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 277–283.
- [8] 于炳松, 陈建强, 林畅松, 等. 塔里木盆地奥陶系层序地层格架及其对碳酸盐岩储集体发育的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 305–316.
- Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Lin Changsong, et al. Sequence stratigraphic framework and its control on development of Ordovician carbonate reservoir in Tarim basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 305–316.
- [9] Charles K. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of west Texas [J]. *AAPG Bull.*, 1988, 72(10): 1160–1183.
- [10] 叶德胜. 塔里木盆地北部寒武–奥陶系碳酸盐岩的深部溶蚀作用[J]. *沉积学报*, 1994, 12(1): 66–71.
- Ye Desheng. Deep dissolution of Cambrian-Ordovician carbonates in the Northern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(1): 66–71.
- [11] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. *地质学报*, 2006, 80(2): 245–253.
- Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. *Acta Geological Sinica*, 2006, 80(2): 245–253.
- [12] 朱光有, 张水昌, 梁英波. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造—四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2182–2193.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Dissolution impact of TSR on the deep carbonate reservoirs—an important forming mechanism of the deep carbonate reservoirs in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2182–2193.
- [13] 黄思静, 胡作维, 邹明亮, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组硫酸盐还原作用对碳酸盐成岩作用的影响[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 815–824.
- Huang Sijing, Hu Zuowei, Zou Mingliang, et al. Influence of sulfate reduction on diagenesis of Feixianguan carbonate in Triassic, NE Sichuan Basin of China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 815–824.
- [14] 陈景山, 李忠, 王振宇, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 858–868.
- Chen Jingshan, Li Zhong, Wang Zhenyu, et al. Paleokarstification and reservoir distribution of Ordovician carbonates in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 858–868.
- [15] 李忠, 黄思静, 刘嘉庆, 等. 塔里木盆地塔河奥陶系碳酸盐岩储层埋藏成岩和构造–热流体作用及其有效性[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 969–979.
- Li Zhong, Huang Sijing, Liu Jiaqing, et al. Buried diagenesis, structurally controlled thermal-fluid process and their effect on Ordovician carbonate reservoirs in Tahe, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 969–979.
- [16] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式[J]. *地质学报*, 2010, 84(8): 1087–1094.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang oilfield in Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 84(8): 1087–1094.
- [17] 王恕一, 蒋小琼, 管宏林, 等. 川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(4): 366–372.
- Wang Shuyi, Jiang Xiaoqiong, Guang Honglin, et al. Diagenesis effects of lower Triassic Feixianguan Formation reservoir in Puguang gas field, northeast Sichuan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 366–372.
- [18] 潘文庆, 刘永福, Dickon J A D, 等. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩热液岩溶的特征及地质模型[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 983–994.
- Pang Wenqing, Liu Yongfu, Dickon J A D, et al. The geological model of hydrothermal activity in outcrop and the characteristics of carbonate hydrothermal karst of lower Paleozoic in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 983–994.
- [19] 刘小平, 孙冬胜, 吴欣松. 古岩溶地貌及其对岩溶储层的控制——以塔里木盆地轮古西地区奥陶系为例[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 265–268.
- Liu Xiaoping, Sun Dongsheng, Wu Xinsong. Ordovician palaeokarst landform and its control on reservoirs in west Lungu region, the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3): 265–268.
- [20] 吕修祥, 杨宁, 周新源, 等. 塔里木盆地断裂活动对奥陶系碳酸盐岩储层的影响[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(增刊I): 48–541.
- Lü Xiuxiang, Yang Ning, Zhou Xinyuan, et al. The impacts of fault's movements on Ordovician carbonate reservoirs in Tarim Basin [J]. *Science in China, Ser. D*, 2008, 38(supplement I): 48–541.
- [21] 王兴志, 王振宇, 马青, 等. 塔里木盆地中部生物屑灰岩段滩体特征及储集性[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(1): 58–62.
- Wang Xingzhi, Wang Zhenyu, Ma Qing, et al. Characteristics

- and reservoir property of bioclastic limestone banks in central Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(1): 58–62.
- [22] 顾家裕, 贾进华, 方辉. 塔里木盆地储层特征与高孔隙度、高渗透率储层成因[J]. *科学通报*, 2002, 47(增刊): 9–15.
- Gu Jiayu, Jia Jinhua, Fang Hui. Reservoir characteristics and genesis of high porosity and permeability in Tarim Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(supplement): 9–15.
- [23] 叶德胜, 王根长, 林忠民, 等. 塔里木盆地北部寒武-奥陶系碳酸盐岩储层特征及油气前景[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000: 1–55.
- Ye Desheng, Wang Genchagn, Lin Zongmin, et al. Characteristics and petroleum potential of Cambrian and Ordovician reservoirs in north Tarim Basin[M]. Chengdu Sichuan: Sichuan University Press, 2000: 1–55.
- [24] 闫相宾, 李铁军, 张涛, 等. 塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(2): 202–207.
- Yan Xiangbin, Li Tiejun, Zhang Tao, et al. Differences between formation conditions of Ordovician karstic reservoirs in Tazhong and Tahe areas [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 202–207.
- [25] 翟晓先, 云露. 塔里木盆地塔河大型油气田地质特征及勘探思路回顾[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 28(5): 565–573.
- Zhai Xiaoxian, Yun Lu. Geology of giant Tahe oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 28(5): 565–573.
- [26] 钱一雄, 陈强路, 陈跃. 碳酸盐岩中缝洞方解石成岩环境的矿物地球化学判识-以塔河油田的沙79井和沙85井为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1027–1032.
- Qian Yixiong, Chen Qianglu, Chen Yue. Mineralogical and geochemical identification for diagenetic settings of Paleo-caves and fractures-filling & vugs calcites in carbonate: taking wells S79 and S85 for example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1027–1032.
- [27] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 743–752.
- He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 743–752.
- [28] Moore C H. Carbonate Diagenesis and Porosity[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publisher B. V., 1989: 161–216.
- [29] Warren J. Dolomite: Occurrence, Evolution and Economically Important Associations [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52: 1–81.
- [30] 顾家裕. 塔里木盆地奥陶统白云岩特征及成因[J]. *新疆石油地质*, 2000, 21(2): 120–123.
- Gu Jiayu. Characteristics and origin analysis of dolomite in Lower Ordovician of Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2000, 21(2): 120–123.
- [31] 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(2): 43–52.
- Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. Forming mechanism of deep high-quality dolomite reservoirs in the Pu-guang gasfield[J]. *Science in China, Ser. D*, 2007, 37(2): 43–52.
- [32] 叶德胜. 塔里木盆地北部丘里塔格群(寒武系至奥陶系)白云岩的成因[J]. *沉积学报*, 1992, 10(4): 77–86.
- Ye Desheng. Dolomite genesis of Qiulitage Group (from Cambrian to Ordovician) in the north Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(4): 77–86.
- [33] 郭建华, 沈昭国, 李建明, 等. 塔北东段下奥陶统白云石化作用[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(1): 51–59.
- Guo Jianhua, Shen Zhaoguo, Li Jinaming, et al. Dolomitization of Lower Ordovician in eastern sector of north Tarim region [J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(1): 51–59.
- [34] 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 277–284.
- Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujian, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 277–284.
- [35] Wei X Ch, Wang J M, Cheng J Sh. Inversion of shear wave interval velocity on prestack converted wave data[J]. *Acta Sis-mologica Sinica*, 2007, 20(2): 180–187.
- [36] 路鹏飞, 杨长春, 郭爱华. 频谱成像技术研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1517–1521.
- Lu Pengfei, Yang Changchun, Guo Aihua. The present research on frequency-spectrum imaging technique [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1517–1521.
- [37] 喻岳钰, 杨长春, 王彦飞, 等. 叠前弹性阻抗反演及其在含气储层预测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 574–580.
- Yu Yueyu, Yang Changchun, Wang Yanfei, et al. Application of the prestack elastic impedance inversion in the gas reservoir prediction [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(2): 574–580.

(编辑 董立)