

# 龙门山地震对川西天然气聚散的影响\*

曹俊兴<sup>1,2</sup> 刘树根<sup>1</sup> 何晓燕<sup>2</sup> 赵亮<sup>2</sup>

1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·成都理工大学 2. 成都理工大学信息工程学院

曹俊兴等. 龙门山地震对川西天然气聚散的影响. 天然气工业, 2009, 29(2): 6-11.

**摘 要** “5.12”汶川大地震瞬间在龙门山内部形成了长达 300 km 的地层岩石破裂错断, 随后又发生余震 4 万多, 这必然改变其内部的压力疏导系统。地震对川西油气聚散有何影响是大家关心的问题。通过对地震特征、地震破裂与地下流体运移关系的分析, 认为龙门山地震对川西地区油气运移聚散有着控制性的影响作用, 并提出了一个龙门山地震控制川西油气运移聚散的概念模型。依据该模型分析认为, 地震将导致龙门山推覆体地层中油气的散失和川西拗陷天然气的爆发式深生浅储成藏。该模型能较好地解释现今川西天然气藏的一些特点。

**关键词** 川西地区 汶川地震 龙门山断裂带 油气运移 散失 聚集 裂缝 气藏形成

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.02.002

## 0 前言

四川盆地是我国三大富气盆地之一, 天然气地质资源量约<sup>[1]</sup>  $5.35 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前勘探开发的气田主要位于川中和川东, 川西气田较少且规模较小。但据估计<sup>[2-3]</sup>, 川西的天然气资源量为  $1.8 \times 10^{12} \sim 2.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 目前的探明率仅约 10%。因此, 川西的天然气勘探潜力很大, 特别是深层海相地层, 这些海相层系是中国石化确定的四大战略突破区之一<sup>[4]</sup>。

川西目前勘探开发的天然气主要集中在浅部侏罗系和深部上三叠统须家河组。多方面的研究表明, 川西侏罗纪地层中的天然气来源于深部的须家河组<sup>[5-6]</sup>, 被称为深生浅储型气藏。川西陆相储层相当致密, 具工业价值的气藏主要是裂缝性气藏。

地震是以岩层的快速破裂为特征的构造运动, 并会造成一定范围内的岩石孔隙流体压力状态的急剧改变, 引起包括油气在内的岩石孔隙流体的快速迁移。国内外都有一些关于天然地震引起油气生产井产量变化的报道<sup>[7-10]</sup>, 使用人工震动方法增加石油产量也是已为生产实践证明可行的强化采油方法<sup>[9]</sup>。李大伟<sup>[11]</sup>曾比较宽泛地讨论过天然地震与油气成藏的关系。曹俊兴等<sup>[12]</sup>在讨论汶川地震相关问题时曾提到过龙门山地震对川西油气聚散的可能影响问题。

龙门山是我国两大构造单元——青藏高原与扬子地块的碰撞结合带, 是一个正在强烈活动着的构造带。大地震的发生具有一定的周期性<sup>[13]</sup>, “5.12”汶川大地震预示龙门山在地质历史上曾经发生过很多类似的大地震。汶川地震瞬间在龙门山内部形成了长达 300 km 的地层岩石破裂错断, 这必然改变了其内部的压力疏导系统。汶川地震后至今的半年多时间内, 龙门山发生余震 4 万余次, 震中分布在长约 350 km、宽 40~80 km 的广大范围内, 覆盖了川西油气探区近一半的面积(图 1)。这些余震震源处也必

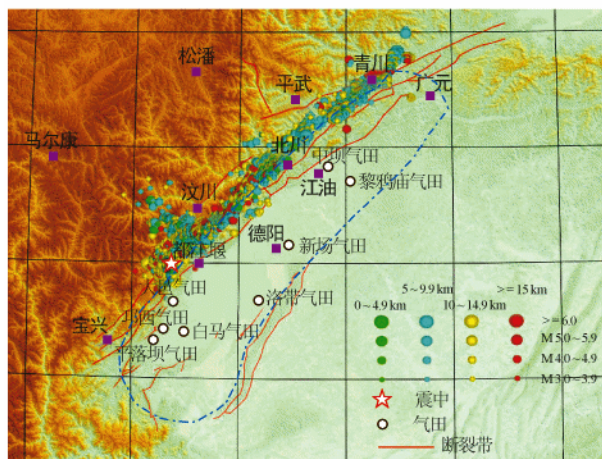


图 1 川西大中型气田的分布与汶川地震及其余震分布图  
注: 震级大于  $M_s 3.0$  作为统计源; 截至 2008 年 11 月 20 日;  
图中的蓝色点线标示川西油气勘探区的范围

\* 本文为国家自然科学基金委员会与中国石油化工股份有限公司联合基金资助项目(编号: 40739907)、中国石化《中国南方(中上扬子)大陆构造与海相油气》项目的研究成果。

**作者简介:** 曹俊兴, 1961 年生, 教授, 博士生导师; 主要从事地球物理反演与成像、油气地球物理勘探等方面的研究与教学工作。地址: (610059) 四川省成都市十里店成都理工大学。电话: (028) 84079523, 13808199784。E-mail: caojx@cdu.edu.cn

然存在一定规模的岩石破裂,这些破裂对地下流体的运移也必然会产生影响。汶川大地震对分析川西油气聚散会有何启示?今日川西油气之分布是否受龙门山历史地震之影响或控制?既是复杂的理论问题,更是重要的实践问题。准确分析龙门山地震对川西油气聚散的影响,对指导川西油气勘探实践具有重要意义。

## 1 川西油气地质勘探概况

在进入正题之前,有必要回顾一下川西油气地质勘探历程。历经50多年的勘探,对川西的地质构造格局已有了比较全面的了解。龙门山是一个比较典型的逆冲推覆构造带,由一系列大致平行的叠瓦状冲断带构成,自西向东发育茂汶—汶川断裂、北川—映秀断裂、彭灌断裂,其中茂汶—汶川断裂(又称后山断裂)是龙门山构造带西北侧的边界断裂,分割了松潘—甘孜和龙门山构造带;北川—映秀断裂是龙门山构造带的主断裂(又称中央断裂);彭灌断裂(又称山前断裂)是龙门山构造带东南侧的边界断裂<sup>[12]</sup>(图1)。

川西拗陷发育有巨厚的陆相碎屑岩系和海相碳酸盐岩系,总厚7~12 km,最厚处位于郫县—什邡一带;陆相与海相地层约各占一半。陆相碎屑岩系主要是上三叠统至白垩系的河流相沉积。对油气勘探最为重要的陆相碎屑岩是上三叠统和侏罗系地层。碳酸盐岩系主要是寒武系、二叠系和上三叠统海相沉积,可能还有震旦系海相沉积。

川西拗陷的烃源岩比较丰富。陆相烃源岩层系主要是上三叠统须家河组,在盆地埋藏较深(逾3500 m),在龙门山有出露。深层海相烃源岩层系有5套:震旦系、下寒武统、下二叠统、上二叠统和下三叠统。

川西最早发现的气田是位于江油附近的中坝气田,发现于1971年,至今已累计开采天然气 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。自中坝气田发现以来的近40 a间,累计在川西拗陷和龙门山钻井300余口,发现气田20多个,其中大型气田2个(新场气田、洛带气田),中型气田6个(中坝气田、白马气田、大邑气田、平落坝气田、邛西气田和黎雅庙气田)(图1)。目前正在加紧勘探中的大邑气田有望成为川西又一个大型气田。

川西目前勘探开发的主要是浅层侏罗系陆相地层中的天然气,主产层为蓬莱镇组和沙溪庙组,其次为遂宁组、千佛崖组及自流井组<sup>[6]</sup>。川西油气勘探现阶段的攻关目标主要是深层须家河组致密裂缝性

气藏,战略接替攻关目标是深层海相碳酸盐岩气藏。

川西油气勘探目前发现的只有天然气,浅、中、深层都有,呈立体分布态势。川西目前勘探开发的主要是浅层侏罗系中的天然气。但据许多学者的多方面研究,川西侏罗系中的天然气来源于深层须家河组<sup>[5-6]</sup>。川西拗陷的上三叠统须家河组( $T_3x$ )纵向上可分为六段,其中须一段、须三段和须五段为烃源岩(不渗透层),须二段、须四段为储集岩(渗透层)和主要的天然气产层,须六段也是储集岩层,但在大部分地区缺失。须家河组的气是如何穿过多个致密的不渗透层而到达浅部侏罗系中的,王金琪<sup>[14]</sup>、谢泽华<sup>[15]</sup>等将其归结于烟囱效应的作用,刘树根等<sup>[6]</sup>则认为爆发式成藏的结果。无论是烟囱效应还是爆发式成藏,都认为深部的天然气是沿断层迁移上来的,烟囱效应说认为这种迁移是一种缓慢的扩散,而爆发式成藏说则认为这种迁移是在异常压力作用下的一种爆发式迁移。上述两种假说都没有考虑天然气成藏和断层的因果关系。

## 2 龙门山地震对川西天然气聚散的影响

地下岩石孔隙中油气的聚与散取决于很多因素,最主要的是运移通道、压差驱动和储集空间,而此三者在实际情况下常常是密切相关的。地震是以地层岩石快速破裂为特征的构造运动。地震破裂裂缝既可作为油气的运移通道,也可成为油气的聚集空间;地震破裂的同时会瞬间改变岩石孔隙流体的压力状态,形成巨大的压差,引起岩石孔隙流体(包括油气)的喷流与抽吸迁移;另外,地震波动对地下岩石孔隙流体的运移也会有显著的助推作用。大地震的发生具有一定的重复性。龙门山地震对川西天然气聚散的影响可以通过对汶川地震相关特点的分析而获得。

### 2.1 汶川地震的有关情况

“5.12”汶川地震的地表同震破裂自汶川县映秀镇附近的震中沿龙门山中央断裂带和前山断裂带向北东方向断续延伸。据徐锡伟等<sup>[16]</sup>的调查,沿中央断裂带(北川—映秀断裂)的地面同震破裂面长约240 km,止于青川县境内,以兼有右旋走滑分量的逆断层型破裂为主,最大垂直位移6.2 m,最大右旋走滑位移4.9 m;沿前山断裂带(彭灌—江油断裂)的地面同震破裂面长约72 km,主要表现为纯逆断层型破裂,最大垂直位移3.5 m。根据国内外学者依据地震记录的反演<sup>[17-21]</sup>,中央断裂带的破裂长度约为300 km。这意味着,地下的破裂面可能要比地表

显露出来破裂面更长。震后,笔者在距离震中约 39 km(距前山断裂带最近处约 13 km)的郫县唐昌镇金星村发现了雁行排列的裂缝,裂缝宽 5~20 cm,长可达 10 m。这些裂缝的存在虽然并不一定就说明地下存在破裂,很可能只是地表破裂,但它的确是汶川地震所造成的;在离震中更远的蒲江熊坡背斜附近也发现有地面破裂。这说明汶川地震造成了大范围的岩石破裂。

“5.12”汶川地震之后,截至 2008 年 11 月 23 日中午 12 时,龙门山共发生余震 3.78 万次,其中 4.0~4.9 级余震 238 次,5.0~5.9 级余震 33 次,6 级以上余震 8 次,最大余震震级 6.4。3 级以上余震的分布参见图 1。图 1 显示,汶川地震余震震中绝大部分位于川西油气勘探区龙门山推覆冲断褶皱带,川西拗陷区较少。但通过对近 10 年来川西及邻近地区地震事件的分析(图 2),川西拗陷区也有许多小的地震事件发生。

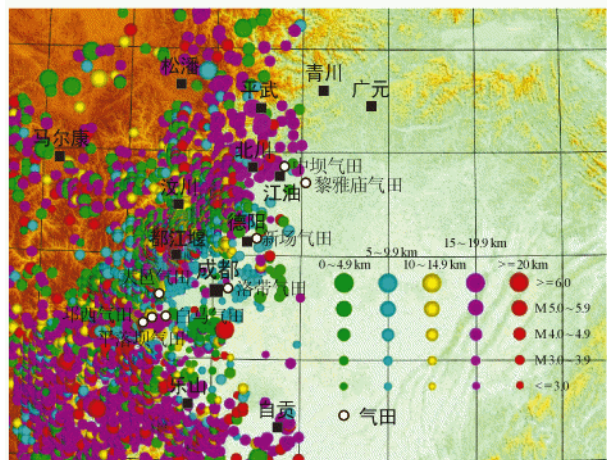


图 2 1999 年至汶川地震前川西及邻近地区的地震事件图

据研究<sup>[17-22]</sup>,汶川地震的震源深度为 10~20 km(不同学者给出的震源深度有一定的差异)。据对 2.8 万个已定位余震震源深度的统计分析,63.78%的余震震源深度介于 5~20 km。震源深度大于 20 km 的余震事件约占 11.02%,其中震源深度介于 30~100 km 的约占 1.1%。震源深度小于 5 km 的余震事件约占 25.26%,这其中可能有相当一部分属于滑坡、崩塌等引起的浅表地震事件。上述数据表明,汶川地震及其余震均属浅源地震。一般来讲,凡中浅源地震其震源处必有破裂发生,差别只在于破裂的性质与规模。汶川地震后,国内外许多学者反演计算过这次地震的破裂与位错,获得的最大位错滑移量介于 7.3(张勇等<sup>[17]</sup>)~12.5 m(王卫

民等<sup>[18]</sup>),同时均认为沿断层面的破裂与滑移分布不均匀(图 3<sup>[23]</sup>)。汶川地震余震事件的震源破裂可用有关统计关系式进行估算<sup>[23-25]</sup>。

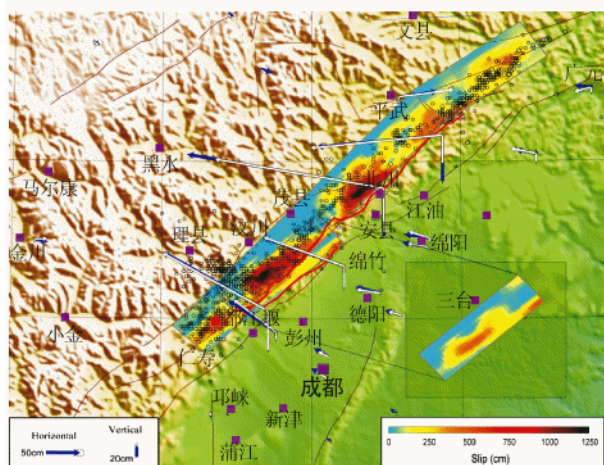


图 3 汶川地震断层模型错距分布投影及理论同震位移与 GPS 观测值对比图

蓝色矢量为 GPS 观测值,白色为理论同震位移;黑色圈代表震后 1 个月内的 3.5 级以上余震(引自王为民、姚振兴<sup>[22]</sup>,2008 年)

引发汶川地震的地下岩石的大规模破裂瞬间改变了岩石孔隙流体的压力状态,引起了岩石孔隙流体的快速迁移,地震时地面裂缝的喷水冒砂、山泉水量激增、裂缝冒气等现象都证明了这一点。

## 2.2 龙门山地震对川西油气聚散的影响分析

川西油气勘探区的地质构造比较复杂,大体可以划分为川西拗陷与龙门山前缘两个区带。龙门山地震对这两个区带的油气运移聚散的影响有所不同。天然地震对油气运移聚散的影响可能有多重机制,以下从 4 个方面来分析探讨:

### 2.2.1 地震破裂形成油气运移通道

大地震会形成很大规模的地层岩石破裂,这些破裂带成为了油气运移通道。如果地震破裂贯通了气藏和地表,则必然导致气藏中天然气的散失;如果地震破裂只贯通了深部气藏与浅部高孔渗储集岩,则必然导致深部气藏中的天然气向浅部运移,形成二次成藏聚集。

汶川地震及余震破裂主要发生在龙门山冲断带。主震破裂带长达 300 km,深可达 20 km,地表观测到了大规模的破裂与位错。这表明汶川地震的破裂贯通了震源与地表,形成了从深部直达地表的开放通道。按照一般的规律推测,龙门山地质历史上的大地震也很可能如此,即破裂从深部震源贯通到了地表。这必然导致断层贯通的深部气藏天然气的散失。也就是说,龙门山大地震将导致震源深度以



上地层中天然气的散失。2007年初,中国石化在龙门山中段大园包构造部署的龙深1井完钻。该井井深为7 180 m,钻穿了川西最重要的陆相含气层——上三叠统须家河组,钻达了下三叠统嘉陵江组,没有获得工业气流。不同学者对此有不同的解释。汶川地震后笔者对此有了新的认识,认为圈闭中的天然气可能在历史地震中散失了。龙门山强震的发震构造是冲断面。因此推断,龙门山冲断面之上地层中的天然气绝大部分可能在历史地震中早已散失殆尽。

据研究<sup>[26]</sup>,震源处的破裂主要沿断裂面发生在很窄的范围内,在垂直断裂面的方向上不会形成很宽的破裂带。也就是说龙门山地震的大规模破裂主要发生在龙门山,山前拗陷深部不会发生大规模的破裂。汶川地震后在山前平原地带发现的地面破裂应该是浅表破裂,而非深部破裂(如果有的话)的地表显露。因为据调查,破裂的喷水冒砂很快便停止了。由此推测,龙门山地震不会造成川西拗陷深部气藏天然气的散失。震后在邛崃等地地裂缝中发现的天然气泄漏更可能只是浅层气藏的小规模散失。

以目前的认知与探测水平,还无法判定龙门山地震在川西拗陷深部(在震源深度上)是否能够形成破裂,以及如果存在地震破裂的话,规模能够达到多大。但强烈的地震波冲击使拗陷内部早先形成的断层裂开成为油气运移通道的可能性是存在的,并且这种可能性很大。而据对历史地震的分析,发生在川西拗陷的小地震事件也不少(图2)。汶川地震后,笔者对川西拗陷侏罗系地层中的深生浅储气藏的形成有了一个新的猜测:深层须家河组地层中的天然气沿同震裂缝向上运移,穿越致密的非渗透地层进入侏罗系高孔渗低孔压地层中,形成深生浅储气藏。地震后,地震裂缝很快会愈合封堵,切断深浅层联系。直到下一次大地震发生时,上述过程才会重演一次,形成所谓的幕式成藏。这一猜测模型能很好地解释川西深生浅储气藏的形成,但我们目前缺乏直接的地震破裂证据。这也是下一步要重点研究解决的问题。

### 2.2.2 地震破裂对深部岩石孔隙流体(油气)的泵式抽吸与输运

地震破裂瞬间会形成一个低压空间,抽吸包括油气在内的岩石孔隙流体,并在深浅部压差的驱动下,将其输运到浅部以至地表。如果地震裂缝贯达地表,向上运移的油气将散失;如果地震裂缝没有贯

达地表,向上运移的油气会在裂缝贯达的高孔渗岩石孔隙中聚集,形成二次成藏。地震破裂在地震波动的作用一下,发生周期性的开合,形成地下岩石孔隙流体的泵式抽吸—输运机制。这可能是地震破裂输运油气的力学机制。

类似汶川地震这样的强波动会使已经愈合的先存破裂、裂缝再次开合(也可以视为同震破裂)形成多幕式或多幕式的地下流体泵式抽吸—输运。川西储层绝大部分都很致密,裂缝是重要的天然气赋存空间,在地震波动的作用下,也很容易成为油气的输运通道。

### 2.2.3 地震波动对岩石孔隙流体(油气)运移的助推

强震震波的波及范围很大,作用力很强,汶川地震在距震中1 530 km之遥的北京引起的地面振动幅度可达7 cm。震动对地下流体的运移有助推作用,这一点已为生产实践和理论研究所证实<sup>[10-12]</sup>。地震波动对岩石孔隙流体运移的微观作用机制可能是多方面的,最重要的机制可能是瞬间的动压使孔隙流体获得了足以冲破孔喉阻障的动能,同时瞬间的动压也会改变岩石的孔隙结构(如使孔喉扩大),形成类似于推动血液流动的脉动输运机制。岩石骨架和孔隙流体对波动应力响应的差异性也是改变固—液界面维系力,导致固体颗粒对液体解吸,助推流体运移的重要因素。

### 2.2.4 地应力的改变助推了流体(油气)运移

地震应力的积聚是一个缓慢而长期的过程。地应力的改变与累积必然传导到岩石孔隙流体。在世界许多地方都观测到过震前震中区地下水位的快速上升现象,这通常被解释为岩石在快速增强的地应力作用下发生了孔隙流体的排出(排液)。汶川地震之后,笔者在分析川西拗陷北段江油中坝气田井压观测数据时就发现,在地震前一个多月(2008年4月8日),该气田深部产层(埋深3 100 m)压力即有明显上升。2008年5月11~13日,即汶川地震前后,该气田多数生产井浅部产层(2 400 m深)压力有所下降,而深部产层压力仍在增加。中坝气田距“5.12”地震震中约155 km,距最近的龙门山断裂带约9 km。这表明大地震前后,震中附近很大范围内的地层压力发生了变化。大震前岩石纵、横波速比的减小<sup>[27]</sup>,也被认为是岩石在增强的地应力的作用下发生了排液,导致横波速度增加,从而使上述比值减小。地震前地下水位的上升和岩石纵、横波速比的减小预示的岩石孔隙流体的排出肯定是岩石孔隙

中油气迁移的机制之一,虽不是地震的后果,但也可视为是地震的相关作用。

龙门山地震对川西油气运移聚散的影响是多方面的,许多因素的作用也是交织在一起的。综合目前所掌握的川西油气地质资料和汶川地震资料认为:龙门山大地震的大规模同震破裂造成了龙门山冲断带推覆构造面之上地层中天然气的散失;川西坳陷的同震破裂对深部岩石孔隙流体(油气)的泵式抽吸与输运是形成川西坳陷深生浅储气藏的主要机制。龙门山地震对川西油气运移聚散的影响可以用图3来说明。图3中的Z—T<sub>2</sub>代表震旦系至中三叠统海相沉积岩,以碳酸盐岩为主;T<sub>3</sub>代表上三叠统须家河组地层,其中深色填充层代表烃源层(须一段、须三段和须五段;非渗透层),点填充层代表高孔隙层(须二段、须四段);J代表侏罗纪地层,K—Q代表白垩纪至现代沉积。

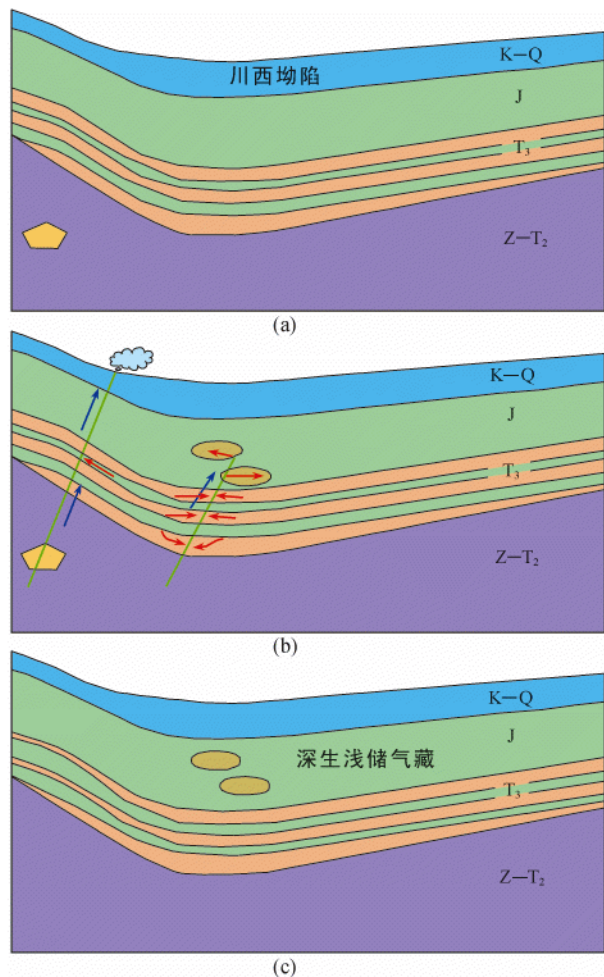


图4 龙门山地震与川西油气运移聚散关系示意图

(a)地层岩石孔隙流体处于静压平衡状态,无油气运移。(b)地震在龙门山形成贯通地表的破裂,深层天然气沿贯通地面的破裂运移至地表逸失;地震在川西坳陷形成贯通深层烃源岩和浅层储集岩的破裂,深层天然气沿破裂运移至浅层形成深生浅储气藏。(c)破裂愈合,地层岩石孔隙流体进入新的静压平衡状态

### 3 认识与讨论

汶川大地震发震突然,破坏巨大,瞬间山河移位、数万同胞蒙难。汶川地震在给我们留下永远痛的同时,也留下了许多待解的科学之谜,川西油气的运移聚散是否受龙门山地震的控制或影响即其中之一。汶川地震后,在分析其发震机理与破坏性时,逐渐认识到川西油气的聚散可能同龙门山地震有关。笔者从地震破裂与流体运移通道、压力驱动、地震波动对岩石孔隙流体运移的助推、地震应力积聚过程中的排液作用等4个方面分析了地震对油气运移可能的控制性影响作用,并以此为基础构建了龙门山地震控制川西油气聚散的概念模型。根据该模型,龙门山地震将导致龙门山冲断带推覆体地层中油气的散失和川西坳陷天然气的爆发式深生浅储成藏。该模型能较好地解释现今川西天然气藏的一些特点,同时对川西的油气勘探也有一定的指导作用。

#### 参考文献

- [1] 王世谦,陈更生,黄先平. 四川盆地油气资源潜力及重点勘探领域[J]. 石油学报,2005,26(增刊):97-101.
- [2] 唐立章,张晓鹏. 四川盆地西部油气资源潜力[J]. 天然气工业,2004,24(7):5-8.
- [3] 柳少波,宋岩,洪峰,等. 中国中西部前陆盆地烃源岩特征与油气资源潜力分析[J]. 地学前缘,2005,12(3):59-65.
- [4] 叶军. 川西海相天然气勘探难点及对策[J]. 天然气工业,2008,28(2):17-22.
- [5] 刘华,刘大成,李书舜. 川西坳陷侏罗系红层天然气成因类型与上三叠统油气同源性探讨[J]. 天然气勘探与开发,2002,25(3):28-33.
- [6] 刘树根,李国蓉,李巨初,等. 川西前陆盆地流体的跨层流动和天然气爆发式成藏[J]. 地质学报,2005,79(5):690-699.
- [7] 吴起林,刘安捷. 海城、唐山两大地震前后油井生产动态的变化[J]. 地震学报,1983,5(4):461-465.
- [8] SIMKIN E M. Hydrodynamic description of oil displacement by water process within the elastic vibration field [C]// Proc Int Conf. Flow Through Porous Media: Fundamentals and Reservoir Engineering Applications,1992:171-175.
- [9] KOUZNETSOV O L, SIMKIN E M, CHILINGAR G V, et al. Improved oil recovery by application of vibro-energy to water flooded sandstones[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,1988,19:191-200.
- [10] 徐守余,孙万华. 油水井异常变化机理与天然地震前兆[J]. 石油勘探与开发,2003,30(4):98-99.

- [11] 李大伟. 试论天然地震与油气成藏和开发的关系[J]. 新疆石油地质, 2004, 24(1): 19-24.
- [12] 曹俊兴, 刘树根. 对四川汶川大地震有关问题的思考与初步认识[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 414-425.
- [13] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [14] 王金琪. 油气活动的烟囱作用[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 193-200.
- [15] 谢泽华. 天然气成藏模式与勘探方法——以川西天然气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 144-147.
- [16] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597-629.
- [17] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2008, 38(10): 1186-1194.
- [18] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川8.0级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403-1410.
- [19] CHEN JI, UCSB, GAVIN HAYES NEIC. Finite fault model-preliminary result of the May 12, 2008 Mw 7.9 Eastern Sichuan, China Earthquake[OL]. [http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite\\_fault.php](http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php).
- [20] 引间和人. 2008年四川省地震の震源过程[OL]. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/china2008/source.html>.
- [21] LEIGH H ROYDEN, B CLARK BORCHFIEL, ROBERTD. The Geological evolution of the Tibetan Plateau [J]. Science, 2008, 321: 1054-1058.
- [22] 王卫民, 姚振兴. 再谈汶川8.0级地震震源破裂过程[OL]. [http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512\\_110.htm](http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512_110.htm).
- [23] 陈培善, 白彤霞. 震源参数之间的定量关系[J]. 地震学报, 1991, 13(4): 401-411.
- [24] 刘静, 汪良谋. 震级与地震破裂参数统计关系式系数的讨论[J]. 地震地质, 1996, 18(3): 225-236.
- [25] 张雅君, 吴忠良, 蒋长胜. 震源过程数字地震成像结果给出的地震参数定标律[J]. 中国地震, 2004, 20(4): 330-340.
- [26] MA S HUO. A physical model for widespread near-surface and fault zone damage induced by earthquakes[J]. Geochem Geophys Geosyst, 2008, 9, Q11009, DOI: 10.1029/2008GC002231.
- [27] 陈颀, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 96.

(收稿日期 2008-12-21 编辑 居维清)