

川西坳陷孝泉—丰谷构造带变形特征 及成因机制模拟

于福生¹, 王彦华², 李晓剑¹, 冯自成¹, 李学良¹

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 河北省地质矿产勘查开发局 第五地质大队, 河北 唐山 063000)

摘要: 通过对三叠系不同组段顶面构造图分析和主干地震剖面解释, 认为川西坳陷孝泉—丰谷构造带具有走向分带、垂向分层变形特征。该构造带走向上可划分为孝泉、新场、合兴场、丰谷等4排北东东向雁列式滑脱褶皱带, 与合兴场—石泉场近南北向背斜构造带近直交; 垂向上以雷口坡组内膏盐层为界分上、下两个构造层, 上部构造层发育滑脱断层及其相关的褶皱构造, 下部构造层产状平缓, 断层、褶皱构造不发育。多组平面、剖面模拟实验结果表明: 孝泉—丰谷北东东向滑脱褶皱带可能是在龙门山褶皱隆升产生的北西向挤压应力和秦巴山系褶皱隆升产生的近南北向挤压应力联合作用下形成的; 合兴场—石泉场近南北向构造带可能是在北西方向的应力单独挤压作用下形成的; 雷口坡组内膏盐层在空间上不均衡分布是产生走向分带、垂向分层变形的主控物质因素。

关键词: 川西坳陷; 孝泉—丰谷构造带; 变形特征; 成因机制; 物理模拟

中图分类号: P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)01-0045-09

Deformation Characteristics and Genetic Simulation of Xiaoquan-Fenggu Structural Belt in West Sichuan Depression

YU Fu-sheng¹, WANG Yan-hua², LI Xiao-jian¹, FENG Zi-cheng¹, LI Xue-liang¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. No.5 Geological Brigade, Hebei Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract Based on structure maps of top surface of different members in Triassic Formation and typical profile interpretation, the deformation characteristics in Xiaoquan-Fenggu structural belt are regarded as horizontal zonation and vertical lamination. NNE trend structure belt that is vertical to the SN trend anticline belt of Hexingchang-Shiquanchang includes Xiaoquan anticline, Xinchang anticline, Hexingchang anticline and Fenggu anticline. Upper and lower structural layers have been divided on the basis of gypsum rock within Leikoupo Formation. Decollement faults and related folds that formed anticline trap developed in the upper layer, and fault-related fold did not develop in the lower part. According to the analyses of simulation result, main control factors of deformation since Mesozoic Era are the compress stress from two sides and non-homogeneous decollement layers. Four conclusions have been drawn as follow: ① strike zonation and vertical lamination is the typical deformation style in the study area; ② NEE detachment fold-fault system developed in the early-middle period of Yanshan Movement in Xiaoquan-Fenggu structural belt, which was controlled by combination process of compress stress from Longmenshan in the west part and Dabashan in the north part; ③ SN anticline belt of Hexingchang-Shiquanchang which superimposed in Xiaoquan-Fenggu structural belt was controlled by the compress stress coming from Longmenshan from Late Yanshan Movement to Himalayan Movement; ④ plane and profile simulation results indicate that non-homogeneous distribution of gypsum rock located on the bottom of Leikoupo Formation may be the main material factor to cause horizontal zonation and vertical lamination.

Key words: West Sichuan Depression; Xiaoquan-Fenggu structural belt; deformation characteristic; genetic mechanism; physical simulation

收稿日期: 2010-06-20

基金项目: 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院项目(20090011); 国家自然科学基金项目(40972091)

作者简介: 于福生(1969-), 男, 黑龙江望奎人, 副教授, 工学博士, 从事构造地质教学与研究。E-mail: fushengyu@cup.edu.cn

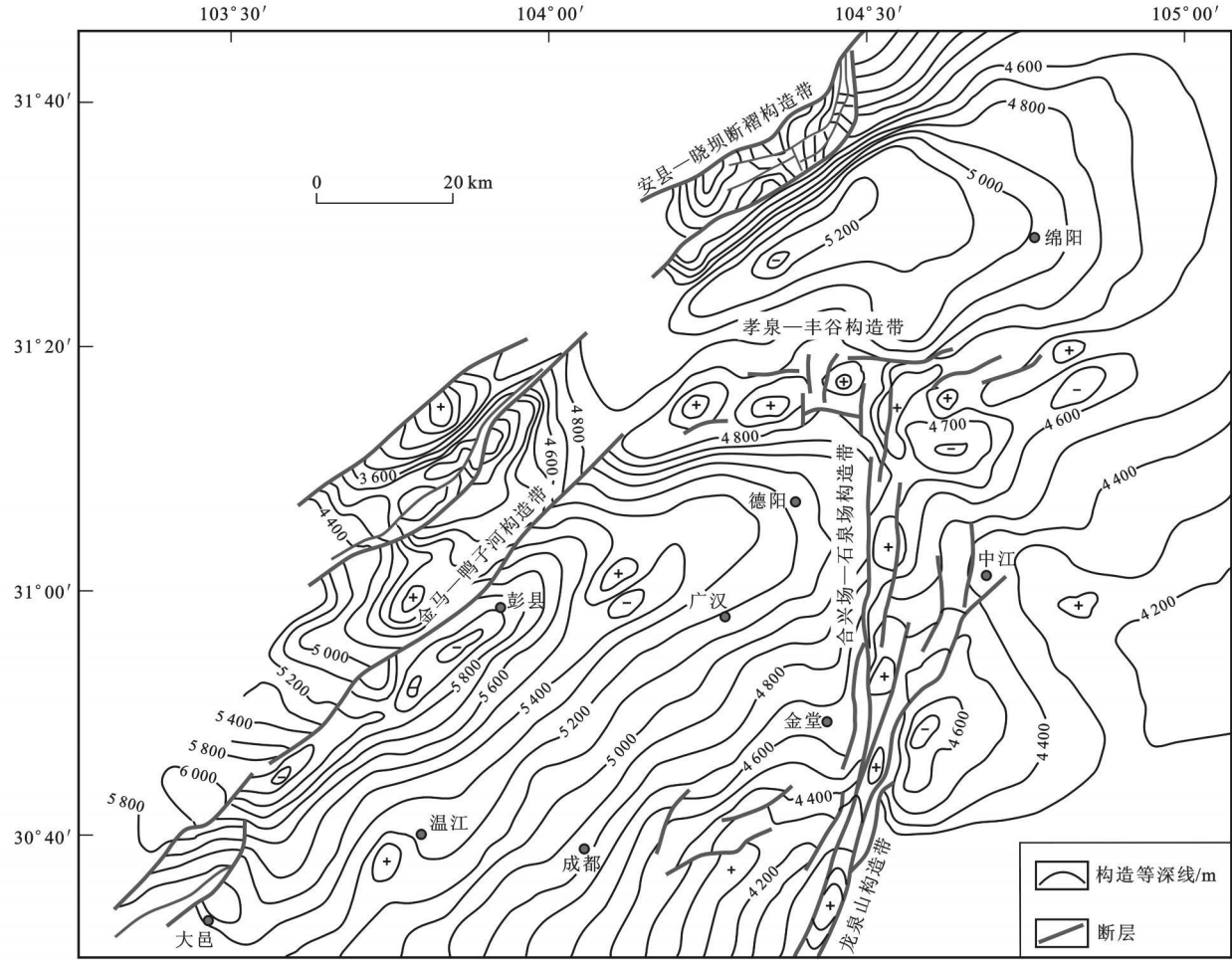
0 引言

孝泉—丰谷构造带是与龙门山构造带斜交的北东东向构造带(图 1),是川西坳陷中北部最主要的天然气聚集带之一。前人关于该地区的研究主要集中在油气成藏特征与形成条件^[1-6]、构造应力分布规律与构造形变特征^[7-10]等方面,而关于北东东向构造带、近南北向构造带的成因机制研究较少,致使对北东东向构造带的形成因素、发育时间及其与近南北向构造带间的关系等方面的认识存在分歧。一种观点认为北东东向构造带是在北西—南东向压扭应力作用下形成的继承性古隆起,起始于印支晚期,发展于燕山期,定型于喜山期^[11-12];另一种观点认为北东东向构造带是在秦巴山系隆升产生的近南北向挤压应力条件下形成的^[9]。最近,还有人认为北东东向构造带是在燕山期来自龙门山方向和来自米仓山方向的挤压应力共同作用下形成的,近南北向构造

带是在喜马拉雅早期由北西西—南东向压扭作用下形成的^[13]。这些认识都是通过对现今构造变形的几何形态分析得出的,而没有通过任何模拟实验证实。笔者在构造变形特征分析的基础上,通过多组平面、剖面模拟实验研究,对北东东向、近南北向两组构造带形成的主要过程及其主控因素进行了分析,对成因机制进行了讨论。

1 区域地质背景

孝泉—丰谷构造带位于川西坳陷中段,西南段与龙门山构造带呈锐角相交,中部与合新场—石泉场近南北向构造带垂直,北侧与米仓山—大巴山褶皱带近平行。所以,孝泉—丰谷构造带的形成主要与西侧龙门山构造带、北侧米仓山—大巴山褶皱带的演化过程有关。大量研究成果认为,龙门山构造带的构造变形始于印支晚期,经过燕山期逆冲和喜马拉雅期推覆作用叠加而形成现今的构造面貌^[14-19]。米仓山—大巴



注:据文献[20]修改

图 1 孝泉—丰谷地区须家河组二段顶面构造图

Fig. 1 Structural Map of Top Surface of the Second Member of Xujiache Formation in Xiaoquan-Fenggu Area
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

山褶皱带呈弧形位于四川盆地北部边缘, 多数学者认为强烈逆冲发生于燕山期中晚期, 定型于喜山期^[21-24]。这两个近直交的构造带在不同阶段活动造成的应力效应是孝泉—丰谷地区构造变形的有力源, 是模拟实验受力边界设置的主要依据。研究区内出露的中生代地层主要为三叠系飞仙关组、嘉陵江组、雷口坡组、马鞍塘组、须家河组; 侏罗系白田坝组(*J_{1b}*)、千佛崖组、沙溪庙组、遂宁组; 白垩系剑门关组、灌口组。其中雷口坡组、嘉陵江组膏岩层、须家河组顶部的煤层都是塑性岩层, 在变形过程中充当滑脱层角色, 对平面、剖面变形样式具有重要的控制作用^[25-29]。

2 构造变形特征

2.1 平面变形特征

孝泉—丰谷构造带走向上呈北东东向, 其南西端与北东向龙门山冲断带的金马—鸭子河构造带以 25° 左右的角度相接; 中段与合兴场—石泉场南北向构造带近垂直(图 1)。平面上由 4 排右阶式短轴背斜组成, 背斜之间发育向斜构造, 单个背斜轴迹略有弯曲(图 2), 背斜两翼发育与轴向大致平行的逆断层。合兴场—石泉场构造带呈近南北向, 其南段与北北东向的龙泉山—中江构造带交接处向南西方向略有偏转。其变形样式为一线状背斜构造, 核部狭窄, 两翼边界均为逆断层, 构成冲起构造。近南北向构造使北东东向构造遭受改造, 表现为近南北向断裂切割北东东向断裂, 同时使北东东向褶皱轴迹发生弯曲, 是一晚期构造表现。

2.2 剖面变形特征

剖面变形样式具有明显的分段性(图 3)。L-

NW-07-163 测线、L-NW-07-151 测线穿过龙门山构造带和孝泉—丰谷构造带, 构造变形样式基本一致, 可划分出 3 个构造段: 西段为龙门山前缘逆冲叠瓦式构造变形样式, 主断层为关口断裂, 从须四段沉积时开始发育, 一直持续到喜山期, 主断层前侧的 3 条逆断层终止在须五段底界面以下, 可能是在须五段沉积前就已形成; 最前缘的一条断层为彭县断裂, 与向斜同时形成于 *J_{1b}* 沉积以后, 总体组成为一前展式逆冲构造组合^[14]。中段为孝泉—丰谷构造带, 变形样式为冲起背斜构造, 由一条主滑脱断层和其上盘的反冲断层组成, 主滑脱面发育在雷口坡组底部膏岩层内, 卷入冲起背斜的最新地层为 *J_{1b}* 以上地层, 所以其形成应该在 *J_{1b}* 地层沉积以后。东段构造变形比较简单, 地层产状平缓, 主要发育小型逆断层。

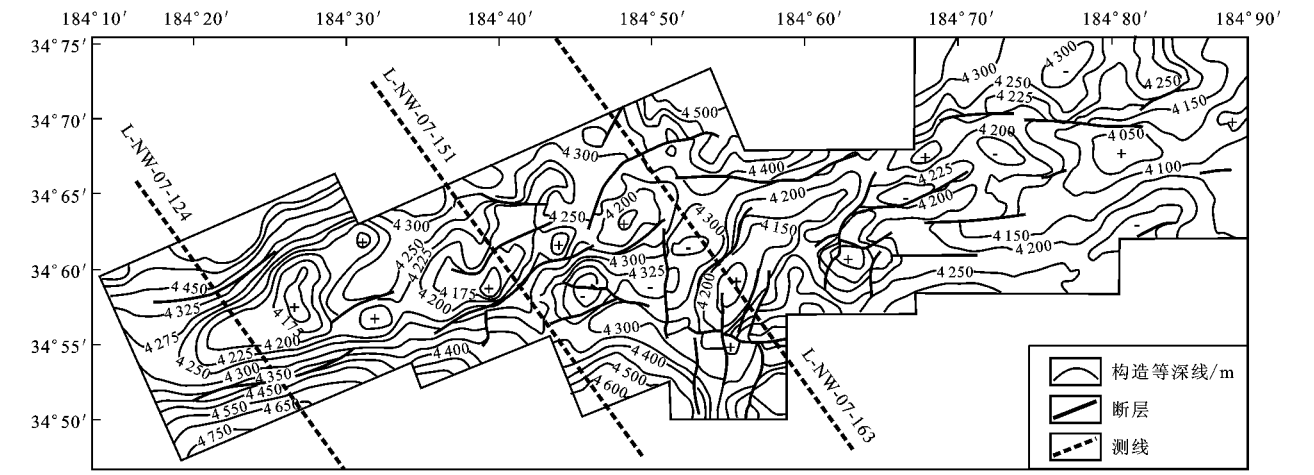
L-NW-07-124 测线位于研究区南部, 穿过龙门山、孝泉—丰谷、合兴场—石泉场 3 个构造带, 构造变形样式也可分成 3 段: 西段为龙门山构造带前缘, 发育逆冲叠瓦式构造组合; 中段为孝泉—丰谷构造带, 变形样式为滑脱断层控制的冲起背斜构造, 形成在 *J_{1b}* 地层沉积以后; 东段为合兴场—石泉场构造带, 变形样式为滑脱断层控制的冲起构造, 背斜核部较窄, 边界断层切割至 *J_{1b}* 地层之内, 形成最晚。

3 平面变形模拟研究

为了合理解释北东东向构造带和近南北向构造带的成因机制及其控制因素, 采用逐步逼近的方法, 通过 8 组实验进行了平面变形模拟研究。

3.1 实验模型及参数条件

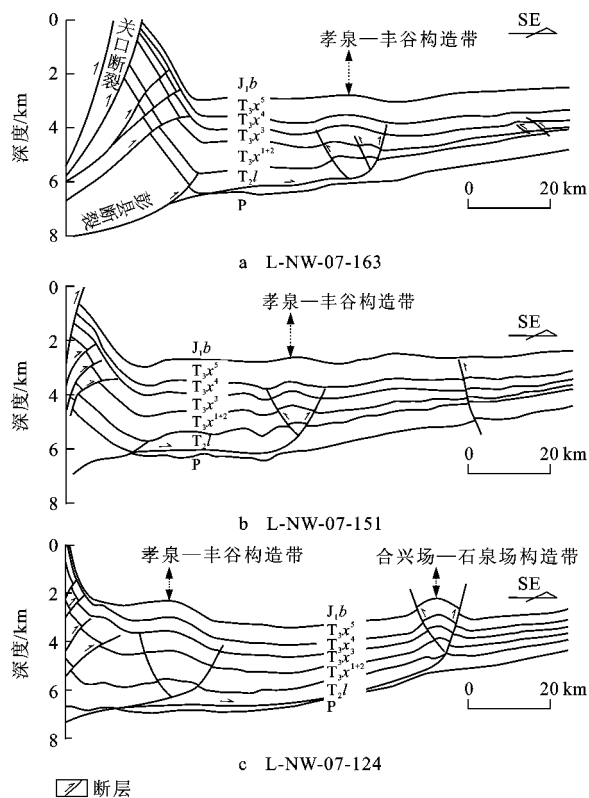
实验①~④是在无滑脱层的条件下, 通过改变



注: 据文献[20]修改。

图 2 孝泉—丰谷构造带须家河组二段顶面构造图

Fig. 2 Structural Map of Top Surface of the Second Member of Xujiache Formation in Xiaoquan-Fenggu Structural Belt
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>



注: T_2f —三叠系雷口坡组; T_3x^{1+2} —三叠系须家河组一段+二段; T_3x^3 —三叠系须家河组三段; T_3x^4 —三叠系须家河组四段; T_3x^5 —三叠系须家河组五段。

图 3 川西拗陷孝泉—丰谷构造带典型剖面

Fig. 3 Typical Profile of Xiaquan-Fenggu Structural Belt in West Sichuan Depression

挤压应力的方向来模拟北东东向构造带形成的力学机制,实验⑤~⑧是在保持挤压应力条件不变的前提下,通过改变基底滑脱层的结构来研究北东东向构造带与近南北向构造带的主控因素,实验主要参数条件如下。

实验①为单侧斜向挤压实验模型(图 4a)。在砂箱挡板左侧放置三角形泡沫代表北东向边界的龙门山构造带,在砂箱底面均匀铺设 4 cm 厚的黄色松散石英砂,利用左侧马达 2 进行挤压,马达推进速度为 1 mm/min;总挤压收缩量为 10.5 cm。

实验②为两侧同期异速挤压实验模型(图 4b)。两侧马达同时挤压,马达 1 由北向南挤压,速度为 1.5 mm/min,收缩量为 8.4 cm;马达 2 由北西向南东斜向挤压,速度为 1 mm/min,收缩量为 6.0 cm。

实验③为两侧分期异速挤压实验模型(图 4b)。马达 1 速度为 2.0 mm/min,马达 2 速度为 1.5 mm/min。马达 2 先挤压 1.2 cm,然后马达 1 和马达 2 再同时挤压,马达 1 总收缩量为 8.4 cm,马达 2 总收缩量为 7.5 cm。

实验④为两侧分期异速挤压实验模型(图 4b)。马达 1 速度为 2.0 mm/min,马达 2 速度为 1.5 mm/min;马达 1 先挤压 1.6 cm,然后马达 1 和马达 2 再同时挤压;马达 1 总收缩量为 9.6 cm,马达 2 总收缩量为 6.0 cm。

实验⑤为具生胶滑脱层同期异速挤压实验模型(图 4c)。砂箱底面先部分铺设 0.8 cm 厚生胶,然后再铺设 3.6 cm 厚的石英砂;两侧马达同时挤压,马达 1 速度为 1.0 mm/min,收缩量为 12.0 cm,马达 2 速度为 0.5 mm/min,收缩量为 6.0 cm。

实验⑥为具生胶滑脱层、先同期双向挤压、后斜向挤压叠加实验模型(图 4d)。砂箱底面先部分铺设 0.8 cm 厚生胶,并预设 2 个生胶隆起带,高度约 1.5 cm,代表膏岩层沉积时厚度集中带,然后再铺设 3.6 cm 厚的石英砂;第一期马达 1 和马达 2 同时挤压,第二期马达 2 单独挤压,马达 1 速度为 1.0 mm/min,收缩量为 5.6 cm;马达 2 速度为 0.5 mm/min,收缩量为 4.4 cm。

实验⑦模型规格和马达挤压条件同实验⑥,差异之处是在砂箱底面先预设 3 个生胶隆起带(图 4e),高度约 1.2 cm,在生胶层与左侧边界泡沫间留有 15 cm 的空隙;马达 1 收缩量为 7.6 cm,马达 2 收缩量为 5.2 cm。

实验⑧模型规格和马达挤压条件同实验⑦,差异之处是在砂箱底面先预设 5 个生胶隆起带(图 4f),高度约 1.2 cm,马达 1 收缩量为 6.0 cm,马达 2 收缩量为 5.2 cm。

3.2 实验结果分析

综合上述 8 组实验模拟结果(图 5)对比分析认为,实验⑧模拟结果与孝泉—丰谷地区须家河组二段顶面构造图形态具有较好的吻合关系,具体表现在下列几方面。

(1)实验模型左侧所代表的龙门山构造带前缘发育的褶皱-冲断构造走向为 $35^\circ \sim 45^\circ$,与构造图上的实际走向(45°)接近。

(2)模型北侧发育的冲断-褶皱构造为近东西向,与大巴山—米仓山构造带的走向一致,在其与孝泉—丰谷构造带之间的地带断裂构造不发育,没有明显的近东西向构造变形,与实际的构造图形态比较相似。

(3)模拟出北东东向构造带走向与实际的孝泉—丰谷构造带走向完全一致,其南西端与龙门山构造带的交接关系也相似。

(4)模拟的北东东向构造带具有明显的分段性,

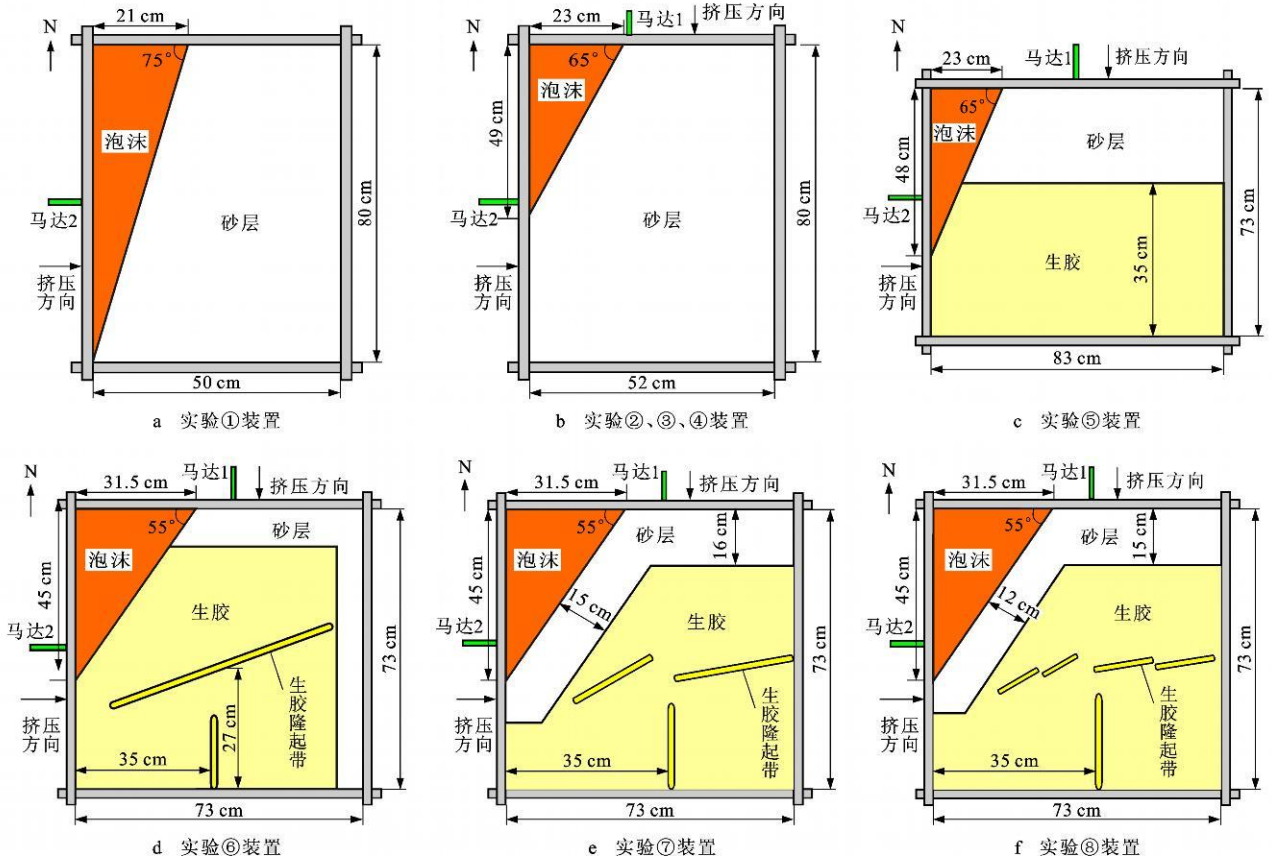


图 4 平面模拟实验装置

Fig. 4 Experiment Apparatus of Plane Simulation

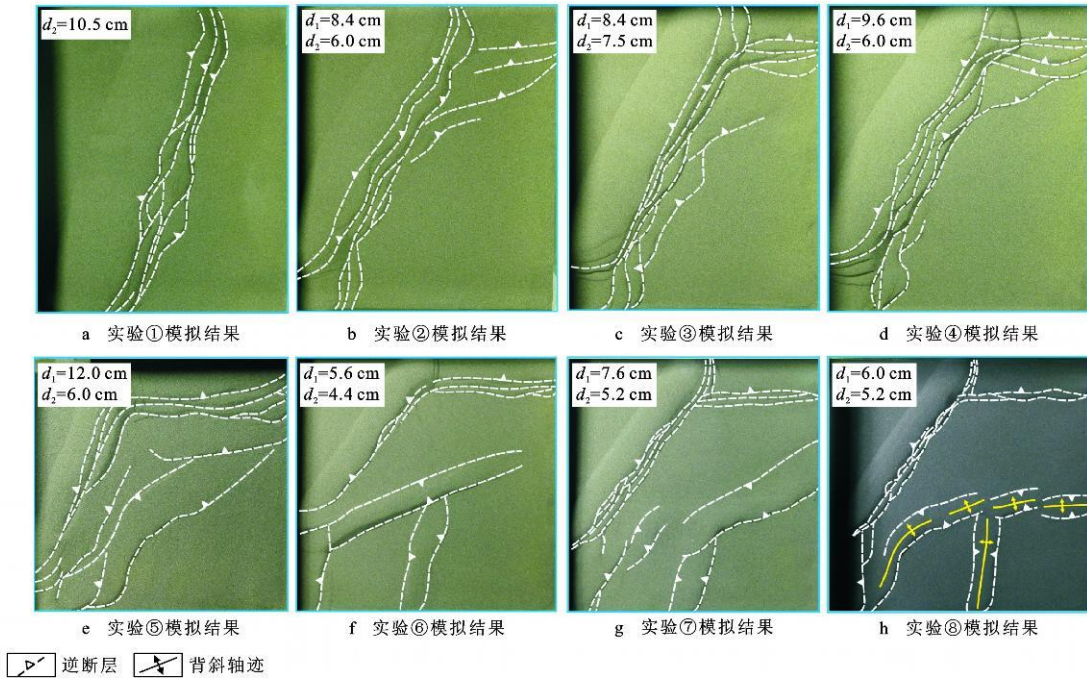


图 5 平面实验模拟结果对比

Fig. 5 Result Correlation of Plane Simulation

至少包括 4 个次级褶皱,其间的距离及排列方式与孝泉—丰谷构造带须家河组二段顶界构造图内发育的次级褶皱构造排列方式和间距也比较近似。

(5)模拟的近南北向构造带与实际的合兴场—石泉场构造带形态、走向及其与北东东向构造带的交接关系都非常吻合;近南北向构造带在南部略向南西方向倾斜的趋势也相似。

上述模拟结果与实际构造图所表现出的各种地质要素间的吻合现象说明平面模拟实验结果是比较理想的,由这些相似性特征可以得出如下认识。

(1)孝泉—丰谷北东东向构造带可能是在北西向和近南北向挤压应力联合作用下形成的,由实验模型的边界条件计算,当时北西向挤压应力的方向应为 $280^{\circ} \sim 290^{\circ}$,南北向挤压应力方向应为 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,这与操成杰野外所实测的燕山早中期构造主应力方位是基本一致的^[27]。

(2)孝泉—丰谷北东东向构造带呈雁列式展布的主要控制因素可能是雷口坡组内膏岩层的不均匀分布,在膏岩层沉积较厚的地段是滑脱构造最容易发育的区域,从而引起盖层产生滑脱褶皱。目前虽然还没有关于雷口坡组内膏岩层沉积厚度分布特征方面的图件来证实,但可与须家河组四段稳定泥岩等值线图进行对比分析,泥岩沉积中心呈北东东向展布,厚度最大的区域也正是冲起背斜发育的地区,从须家河组三段底界与白田坝组底界之间的地层厚度图也具有类似现象^[27]。从现今地震剖面特征来看,雷口坡组与须家河组四段地震反射轴特征整体一致,两者当时的沉积中心范围可能相同,推测沉积了厚度较大的膏岩层。

(3)近南北向的合兴场—石泉场构造带是北东东向构造形成之后的晚期构造,是在来自龙门山方向应力单独挤压作用下形成的,其空间位置受滑脱层的分布特征控制。在雷口坡组沉积时期可能存在近南北向的断陷构造,堆积了厚度较大的膏岩层。

(4)孝泉—丰谷北东东向构造带是燕山早、中期联合挤压构造作用的结果,而近南北向的合兴场—石泉场构造带是燕山晚期—喜山期单独挤压作用的结果。

4 剖面变形模拟研究

为了研究垂向分层构造变形特征,选择 L-NW-07-124 测线地震剖面变形样式为地质模型,参照平面模拟所对应的应力条件,设计了 3 组剖面模型进行了模拟验证。

4.1 实验模型及参数条件

实验 I 砂箱模型长 80 cm,宽 20 cm,左边以—与活动挡板成 35° 的泡沫为边界(代表挤压应力方向与受力边界间的夹角为 55°)。首先在底部铺设一层中间厚(1.2 cm)、两侧薄(0.6 cm)的硅胶,中间凸起处距离泡沫边界为 53 cm,硅胶与泡沫间距离为 28 cm。硅胶上面铺 4 层黄色石英砂,厚分别为 1.5 cm(代表 T_2I)、0.7 cm(代表 T_3x^{1+2})、0.9 cm(代表 T_3x^3)、0.9 cm(代表 T_3x^4);第五层为厚 1.5 cm 的白色生胶(代表 T_3x^5),第六层为厚 1.5 cm 的黄色石英砂(代表 J_1b);第七层为厚 0.5 cm 黄色石英砂(代表 J_1b 以上地层)。利用左侧马达进行挤压,第一期马达推进速度 2 mm/min,待出现明显的冲断带时,停止挤压;再铺上 T_3x^5 和 J_1b 地层后,进入第二期挤压,推进速度为 1 mm/min。最后铺设 J_1b 以上地层,然后进入第三期挤压,推进速度为 1 mm/min。

实验 II 模型规格、材料叠置关系、马达推进速度与实验 I 相同,只是将底部硅胶中间凸起处距离泡沫边界改为 58 cm,硅胶与泡沫间距离改为 21 cm。

实验 III 模型规格同实验 II,底部硅胶中间凸起处距离泡沫边界为 46 cm,硅胶与泡沫间距离为 8 cm。硅胶上面铺 7 层黄色石英砂,厚分别为 1.5 cm(代表 T_2I)、0.5 cm(代表 T_3x^{1+2})、0.7 cm(代表 T_3x^3)、0.7 cm(代表 T_3x^4)、1.2 cm(代表 T_3x^5)、1.5 cm(代表 J_1b)、1.5 cm(代表 J_1b 以上地层),第一期马达推进速度为 2 mm/min;第二期马达推进速度为 1 mm/min。

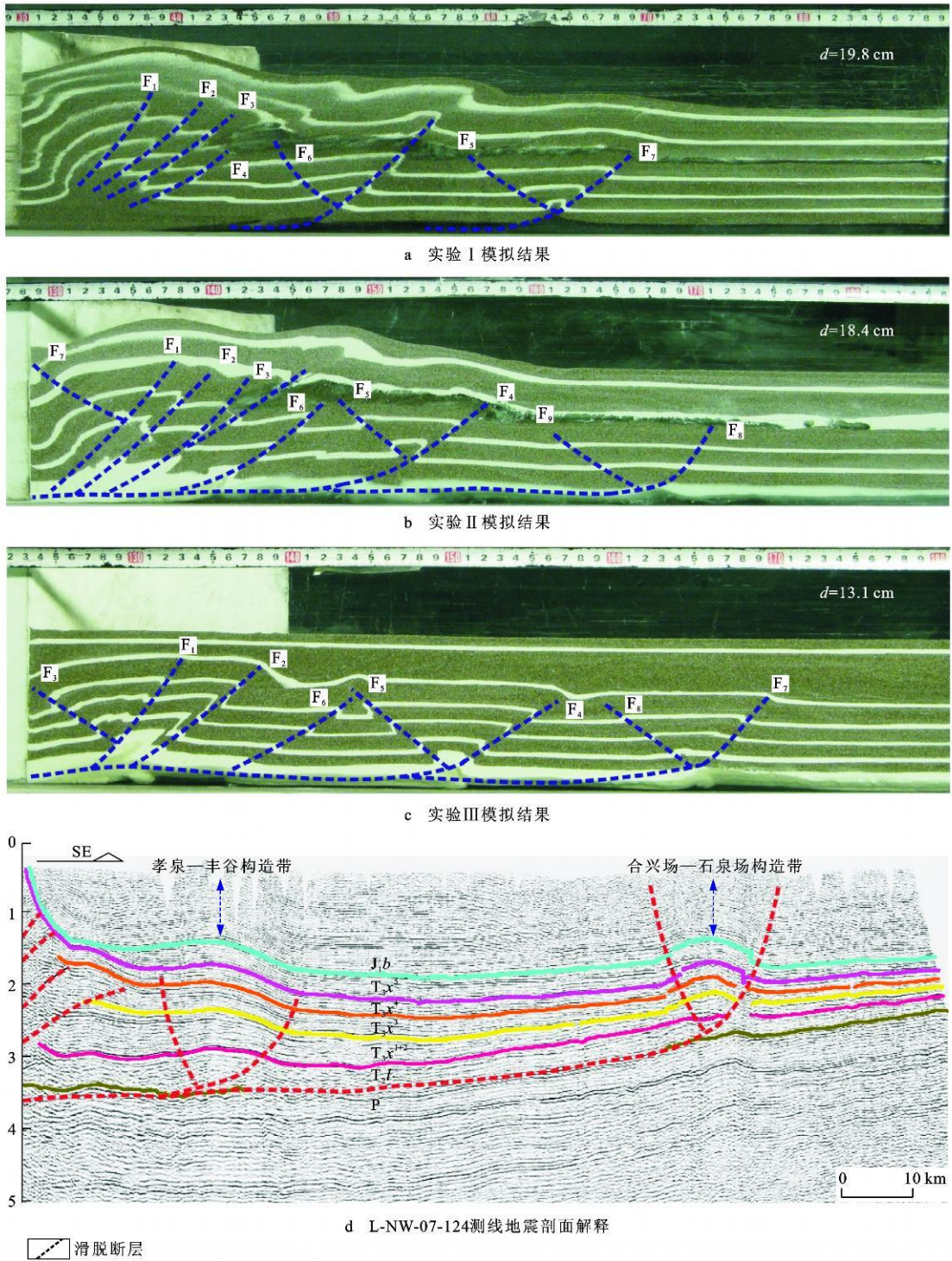
4.2 实验结果分析

对比分析上述 3 组实验模拟结果(图 6)可得出如下认识。

(1)3 组实验模型的受力边界与挤压应力间的交角都是 55° ,底部都具有滑脱层,这与平面模拟条件相同,产生的主要变形样式也相似。

(2)实验 I、II 是具有双滑脱层的三期挤压变形,总体变形样式一致,在后缘发育叠瓦式逆冲构造,中部和前部发育两个冲起构造;不同之处是两个冲起构造间的距离稍有差别,原因是下部滑脱层距离泡沫边界间的距离略有差异。

(3)实验 III 是具有单滑脱层两期挤压构造变形。滑脱层只在下部,与泡沫边界间的距离只有 8 cm,产生的变形样式是后缘逆冲构造隆起不大,前缘两个冲起背斜近等间距分布,背斜对称,顶面平直,具有箱状褶皱特征。



注: d —挤压收缩量。

图 6 剖面实验模拟结果对比

Fig. 6 Result Correlation of Profile Simulation Experiment

(4)对比 3 个实验结果, 综合考虑认为实验 II 与实际剖面相似程度最高, 后缘逆冲断裂、中部背冲构造、前部冲起构造都很相似, 三者是前展式逆冲滑脱作用分期发育的构造变形。

距离与实际剖面相比间距较小, 在实验过程中反复设置下部滑脱层的厚度变化位置, 也无法产生与剖面距离近似的冲起构造。原因可能是由于剖面只能实现单侧挤压作用, 不能像平面那样两侧同时挤压。

(5)模拟结果不足之处是 2 个冲起背斜间的

5 讨论

5.1 孝泉—丰谷北东东向构造带成因

前人大多认为,孝泉—丰谷北东东向构造带形成于印支中、晚期,发展于燕山期,定型于喜山期,是一个大型继承性隆起^[28-29];操成杰根据应力测量结果认为印支运动中幕区域主压应力为近南北向^[27];印支运动晚幕区域主压应力为北西向 303° ;燕山运动早—中幕主应力为北东向 67° ;燕山晚幕主应力为北西向 296° ;喜马拉雅运动主应力为近东西向。如果孝泉—丰谷构造带形成于印支运动中幕,那么应该形成近东西向逆断层和褶皱;在印支运动晚幕挤压作用下应该发育北东向 30° 走向的逆断层及其相关褶皱;在燕山运动早—中幕应力作用下,应形成北西向 330° 的逆断层和褶皱;在喜马拉雅期应力挤压作用下,应形成南北向断裂和褶皱。在构造应力场转变如此大的构造背景下,所形成的褶皱、断裂构造都应该在地震剖面和平面上表现出多期构造叠加的特点。但现今的地震剖面上却没有明显的多期褶皱轴向与深浅层断裂变形样式差异叠加的现象,区域平面构造图上,除北东东向与近南北向构造叠加外,其他方向的构造不发育。根据地震剖面反射特征与平面、剖面物理模拟结果可得出如下启示。

(1)孝泉—丰谷构造带现今的地震剖面没有明显的多期构造叠加现象,卷入北东东向褶皱的地层从下部须家河组向上延伸至侏罗系,褶皱幅度连续一致,在侏罗系底界面以下地震反射层没有剥蚀削截现象。如果将侏罗系底界面拉平,褶皱将不存在,说明褶皱是在侏罗系沉积时或沉积后同一构造作用下形成的,是燕山期构造作用的结果,而无法证实是在印支期构造作用形成雏形,再经燕山期加强后,于喜山期定型的。

(2)平面模拟结果表明,无论是北西向单独斜向挤压,还是南北向单独正向挤压,都不会形成北东东向的构造带,只能产生平行斜向边界或正向边界的断褶带,即使产生斜列式褶皱,其轴向也基本与斜向边界平行或呈微小角度相交(图5)。

(3)平面模拟结果表明,无论是北西向斜向先期挤压,还是南北向正向先期挤压后再联合挤压,在没有滑脱层的情况下都不会形成北东东向的构造带,只能形成平行于挤压边界的强变形带,或在挤压晚期,靠近两边界附近会形成北东向逆冲断层。

(4)只有在底界具有滑脱层时,在北西向斜向挤压和南北向垂向挤压联合作用下,才可能形成北东

东向冲起构造带,也只有当在滑脱层与两挤压边界间存在一定间隙时,并预设先存斜列式凸起时,才可以形成与孝泉—丰谷构造带相类似的雁列状排列的背冲式断褶构造带。

(5)模拟结果表明:孝泉—丰谷构造带是在来自北侧秦巴褶皱山系隆升产生的近南北向应力与来自西侧龙门山隆升产生的北西向应力共同作用下形成的,与操成杰所测试的燕山早、中期应力场特征比较吻合,说明孝泉—丰谷北东东向构造带是在燕山早、中期一次构造作用下形成的,与地震剖面反映的特征一致。

(6)通过平面、剖面模拟结果证明,雷口坡组内泥膏岩层的不均衡分布是形成孝泉—丰谷构造带雁列式褶皱分布的主要原因。北东东向褶皱发育的位置、走向与须家河组泥膏岩厚度最大的区域分布形态一致,与刘诗荣等所划分的四川盆地及邻区中三叠世雷口坡组闭塞台地相、盐湖亚相的北东东向分布形态也是吻合的^[28]。说明中三叠世泥膏岩层的厚薄变化是控制晚期挤压变形的物质因素。

5.2 合兴场—石泉场近南北向构造带成因

关于合兴场—石泉场近南北向构造带,前人一般认为是燕山晚期—喜山期形成的,是由于龙门山持续逆冲挤压,在山前形成叠瓦状逆冲构造样式,并以雷口坡组底部膏岩层为滑脱面将部分位移量向盆地内传递,滑脱断层的分叉向上逆冲受阻后形成反冲断层,组成冲起背斜构造^[29]。也有人认为是印支期发育、燕山期改造、喜山期定型的^[20,28]。从现今的地震剖面反射特征和本次模拟实验结果综合分析,笔者认为合兴场—石泉场近南北向构造带是燕山晚期—喜山期形成的,主要依据如下。

(1)从L-NW-07-124测线地震剖面反射特征可以看出,卷入褶皱的地层自下部三叠系直至地表,上下构造幅度基本一致,是持续挤压作用的结果。

(2)在龙门山逆冲推覆带的前缘白垩系底界发育不整合面,白垩系地层向盆地增厚,在主逆冲断层面上盘缺失,说明自燕山晚期以来龙门山在持续隆升,在前缘产生向盆地方向的挤压作用是盆地内部滑脱变形的力源。

(3)平面模拟实验结果表明,近南北向构造带是在北东东向构造带形成之后,在北西向应力单独作用下形成的,而不是与北东东向构造同时形成的。

(4)剖面模拟实验结果也表明是在先形成孝泉—丰谷构造带后,由于底面滑脱断层继续向前传递,才开始形成合兴场—石泉场构造带。

(5)实验模拟结果表明,雷口坡组内膏岩层是控制滑脱断层发育的主要因素,其厚度在南北向局部增厚,是控制南北向构造带发育的主要物质因素。

6 结语

(1)平面、剖面构造变形特征表明,川西坳陷孝泉—丰谷构造带具有走向分带、垂向分层变形特征。走向上可划分为孝泉、新场、合兴场、丰谷等4排北东东向右阶雁列式滑脱褶皱带;垂向上以雷口坡组内膏盐层为界分上、下两个构造层,上部构造层发育滑脱断层及其相关的褶皱构造,下部构造层产状平缓,断层、褶皱构造不发育。合兴场—石泉场构造带变形样式为滑脱断层控制的近南北向冲起背斜构造。

(2)平面物理模拟实验结果初步证明,孝泉—丰谷北东东向构造带可能是在来自西侧龙门山褶皱隆升产生的北西向挤压应力和来自北侧秦巴山系褶皱隆升产生的近南北向挤压应力联合作用的结果,形成于燕山运动早中期,而非印支期。

(3)平面模拟实验结果表明,合兴场—石泉场构造带是在燕山晚期—喜山期形成的叠加在孝泉—丰谷北东东向构造带之上的晚期构造,可能是在来自北西方向的应力单独挤压作用下形成的近南北向构造,而不是与北东东向构造同时形成的。

(4)平面、剖面模拟结果证明,雷口坡组内泥膏岩层厚度的不均衡分布可能是导致孝泉—丰谷雁列式褶皱带和近南北向合兴场—石泉场构造带发育的主控物质因素。

参考文献:

- [1] 郭学德. 川西孝泉构造侏罗系裂缝型气藏研究[J]. 天然气工业, 1993, 13(6): 22-26.
- [2] 李恒让, 江健, 王世泽. 川西坳陷孝泉构造天然气成藏基本特征[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 11-15.
- [3] 潘杨辉, 徐海波. 川西坳陷丰谷构造须四段的流体识别[J]. 内蒙古石油化工, 2006(11): 135-136.
- [4] 何志国, 熊亮, 杨凯歌. 川西坳陷中段新场构造须二气藏主控因素分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 18-22.
- [5] 耿玉臣. 孝泉构造侏罗系“次生气藏”的形成条件和富集规律[J]. 石油实验地质, 1993, 15(3): 262-271.
- [6] 蒲军, 张金川, 王志欣, 等. 川西坳陷深盆地气研究进展与问题讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 34-37.
- [7] 李留伟, 吴建军, 龙学, 等. 川西新场构造地应力分布规律研究及其应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(9): 80-82.
- [8] 张守仁, 万天丰, 陈建平. 川西坳陷孝泉—新场地区须家河组二—四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 70-74.
- [9] 陈晓华, 李贵学, 赵泽江. 川西坳陷新场气田东部构造变形特征和天然气成藏条件分析[J]. 矿物岩石, 1997, 17(4): 55-60.
- [10] 白贵鑫, 程传录, 郭春喜, 等. 汶川地震地形形变监测与分析[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 205-210.
- [11] 叶泰然, 黄勇, 王信, 等. 川西坳陷中段丰谷构造须家河组二段致密砂岩储层油气预测方法研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1): 82-86.
- [12] 黄泽光, 刘光祥, 潘文蕾, 等. 川西坳陷压扭应力场的形变特征及油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 701-707.
- [13] 李智武, 刘树根, 林杰, 等. 川西坳陷构造格局及其成因机制[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 645-653.
- [14] 王二七, 孟庆任, 陈智樑, 等. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J]. 地质前缘, 2001, 8(2): 375-384.
- [15] 王金琪. 龙门山印支运动主幕辨析[J]. 四川地质学报, 2003, 23(2): 65-69.
- [16] 邓康龄. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 485-490.
- [17] 吕志洲, 赵锡奎. 四川盆地西缘龙门山冲断推覆构造带构造演化特征研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008(5): 208-210.
- [18] 于福生, 张芳峰, 杨长清, 等. 龙门山前缘关口断裂典型构造剖面的物理模拟实验及其变形主控因素研究[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2): 147-158.
- [19] 邓绍强, 胡明, 颜彬, 等. 龙门山北段构造模式及油气勘探方向[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(4): 184-188.
- [20] 叶泰然, 颜琰, 王安志, 等. 孝泉—新场—合兴场、丰谷地区须家河组二、四段气层分布预测研究[R]. 成都: 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院, 2004.
- [21] 汪泽成, 邹才能, 陶士振, 等. 大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 23-28.
- [22] 李智武, 刘树根, 罗玉宏, 等. 南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(3): 294-304.
- [23] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 大巴山中—新生代隆升的裂变径迹证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2901-2910.
- [24] 程万强, 杨坤光. 大巴山构造演化的石英 ESR 年代学研究[J]. 地质前缘, 2009, 16(3): 197-206.
- [25] 金文正, 汤良杰, 杨克明, 等. 川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1072-1080.
- [26] 汤良杰, 杨克明, 金文正, 等. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(增): 30-40.
- [27] 操成杰. 川西坳陷中段孝泉—新场—丰谷构造带须家河组储层裂缝分布规律研究[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 2005.
- [28] 刘诗荣, 许德君, 杨惠明, 等. 川西坳陷中段中、下三叠统海相碳酸盐岩油气成藏条件研究[R]. 成都: 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院, 2002.
- [29] 陈伟, 唐进, 黎邦荣, 等. 四川盆地中西部构造演化与构造特征研究[R]. 成都: 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院, 2007.