

四川盆地西部陆相碎屑岩层系 演化与构造变形特征

余一欣^{1,2}, 汤良杰^{1,2}, 陈 茜^{1,2}, 于冬冬^{1,2}, 金文正³, 吴 航¹, 徐小龙^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083)

摘 要:四川盆地西部地区沉积了较厚的陆相碎屑岩,同时也是重要的勘探目的层系。根据地层平面展布特征以及剖面解释结果,并结合区域地质背景,分析了四川盆地西部陆相碎屑岩层系的演变过程及其构造变形特征。结果表明:受周缘造山带在不同时期差异隆升的影响,四川盆地陆相碎屑岩层系的沉积中心发生了有规律的迁移,从晚三叠世时的川西前陆盆地迁移至早—中侏罗世时的川东北前陆盆地;四川盆地西部地区陆相碎屑岩层系遭受了印支期、燕山期和喜山期等多期构造事件的影响,盆地属性也随之发生改变,从陆相碎屑岩层系沉积前的克拉通内裂陷盆地转变为晚三叠世早期的大陆边缘盆地,并最终演变为现今的陆内前陆盆地;四川盆地西部陆相碎屑岩层系构造变形以逆冲推覆和褶皱变形为主,兼具弱走滑作用,主要发育叠瓦冲断带、背冲断块、断层相关褶皱、飞来峰等构造样式,同时表现出一定的横向分带性,并控制了圈闭发育的分带性。

关键词:陆相碎屑岩;构造变形;演化特征;大陆边缘盆地;前陆盆地;差异隆升;沉积中心;四川盆地
中图分类号:P618.130.2;TE121.2 **文献标志码:**A

Evolution and Structural Deformation of Continental Clastic Rocks in the Western Sichuan Basin

YU Yi-xin^{1,2}, TANG Liang-jie^{1,2}, CHEN Qian^{1,2}, YU Dong-dong^{1,2},
JIN Wen-zheng³, WU Hang¹, XU Xiao-long^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Thick continental clastic rocks, which are important exploration layers, are deposited in the western Sichuan Basin. Based on the analysis of stratigraphic distribution, cross sections and regional setting, the evolution processes and structural deformation of continental clastic rocks in the western Sichuan Basin were discussed. The results show that because of the differential uplifting of peripheral orogens, the depocenters of continental clastic rocks in Sichuan Basin migrate regularly; the depocenter locates in the western Sichuan foreland basin in Late Triassic, and then shifts into the northeastern Sichuan foreland basin in Early-Middle Jurassic; the continental clastic rocks in the western Sichuan Basin are influenced by multi-phase tectonic events, including the Indosinian, Yanshanian and Himalayan movements; during the various

收稿日期:2014-10-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41472117,41125010);

国家科技重大专项项目(2011ZX05002-006,2011ZX05031-001,2011ZX05029-002)

作者简介:余一欣(1977-),男,江西婺源人,副教授,工学博士,E-mail:yuxin0707@163.com。

tectonic movements, the basin types of the western Sichuan Basin change from an intra-cratonic rift basin in Early-Middle Triassic to a continental margin basin in Early Late Triassic, and then to an intracontinental foreland basin in the subsequent stages; thrust faults and folds are the most distinctive deformation characteristics of the continental clastic rocks in the western Sichuan Basin, and some major faults also have weak strike-slipping movement; the main structural styles involve imbricate thrust systems, pop-ups, fault-related folds and klippe, etc.; the zonation of structural deformation is horizontal, which has also controlled the zonation of traps.

Key words: continental clastic rock; structural deformation; evolution characteristic; continental margin basin; foreland basin; differential uplifting; depocenter; Sichuan Basin

0 引言

四川盆地是中国目前最重要的天然气产区之一,经过多年勘探,已在深层海相碳酸盐岩层系中发现了罗家寨、磨溪、威远、五百梯、普光、元坝、安岳等多个大中型气田^[1-6],近年来又在浅层陆相碎屑岩层系相继获得了一系列重大突破,证实陆相碎屑岩层系也具有很大的勘探潜力^[7-8]。四川盆地四周被龙门山、米仓山、大巴山等造山带所围绕,盆地与周缘造山带共同组成了一个复合盆山体系,而且周缘造山带还发生了不同时期差异隆升活动^[9-12]。受龙门山造山带隆升影响,四川盆地西部三叠系及上覆层系主要发育海相碳酸盐岩-海相碎屑岩-陆相碎屑岩的沉积组合^[13-15],表明四川盆地西部地区在不同时期构造事件的影响下,形成演化经历了重要的转换过程^[15-17],同时在这种转换过程中形成了一系列复杂的逆冲推覆构造,并表现出明显的分段性、分带性和分层性^[18-22]。近年来油气勘探工作的逐步开展为深入分析四川盆地西部地区碎屑岩层系的演化与构造变形提供了丰富的地质资料。本文主要结合前人区域地质研究成果,在分析四川盆地陆相碎屑岩层系展布特征的基础上,分析了西部地区陆相碎屑岩层系演化阶段及其不同时期的盆地属性,并总结了陆相碎屑岩层系主要构造变形特征,拟为该地区的油气勘探提供借鉴和参考。

1 地质概况

四川盆地是一个在前震旦纪变质岩基底上发育起来的大型叠合盆地。在大地构造位置上,四川盆地位于扬子准地台西缘,北邻秦岭褶皱带,西临松潘—甘孜褶皱带^[23-24]。从印支期开始,四川盆地初具雏形,后经喜山期强烈的压扭性断褶活动,形成现今盆地的形态和构造面貌。总体来看,四川盆地经历了长期复杂的形成演化过程,演化具有阶段性和

旋回性特点,在垂向上表现为“陆盆”(T₃—N)叠置于“海盆”(Z—T₂)之上。

研究区位于四川盆地西部龙门山山前,整体呈 NE 向展布,南、北分别以北川—映秀断裂带和龙泉山断裂带以及松潘—甘孜褶皱带和川中隆起带相邻,进一步可划分出龙门山冲断带、龙门山山前断褶带、龙泉山构造带、孝泉—丰谷构造带、梓潼凹陷、成都凹陷和蒲江断褶带等次级构造单元(图 1)。研究区内沉积了最厚可达 6 km 的陆相碎屑岩,主要由上三叠统须家河组、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系组成,其中须二段、须四段和侏罗系是四川盆地西部地区主要的浅层勘探目的层系(图 2),多属低孔、低渗、非均质性明显的致密和超致密储层^[25-27]。

2 层系展布特征

从四川盆地陆相碎屑岩层系的平面展布来看,较厚的碎屑岩地层主要分布在盆地西部和东北部的山前地区,整体向东部逐渐减薄,这主要与扬子地台边缘造山带隆升形成的前陆盆地有关。当须家河组开始沉积时,下伏雷口坡组顶面呈东高西低形态,是一个区域性超覆面。须家河组整体呈 NE—SW 向展布,并自西向东超覆减薄,沉积中心位于龙门山山前的都江堰附近,最厚超过 4 km[图 3(a)],沉积相类型主要包括冲积扇、辫状河、曲流河、浅湖和三角洲相等^[28]。至侏罗系沉积时,沉积中心已迁移至盆地东北部大巴山山前,地层厚度自 NE 向 SW 逐渐减薄[图 3(b)]。白垩系的两个沉积中心分别位于米仓山和龙门山北段山前地区,其厚度自西向东逐渐减薄,并在盆地东部的重庆—万州一带被剥蚀殆尽[图 3(c)]。古近系和新近系沉积中心与白垩系相比并无明显迁移,但由于盆地边缘进一步隆升以及盆地内部褶皱抬升,导致其沉积范围进一步缩小,仅局限分布在盆地西南部的天全、芦山、名山和雅安

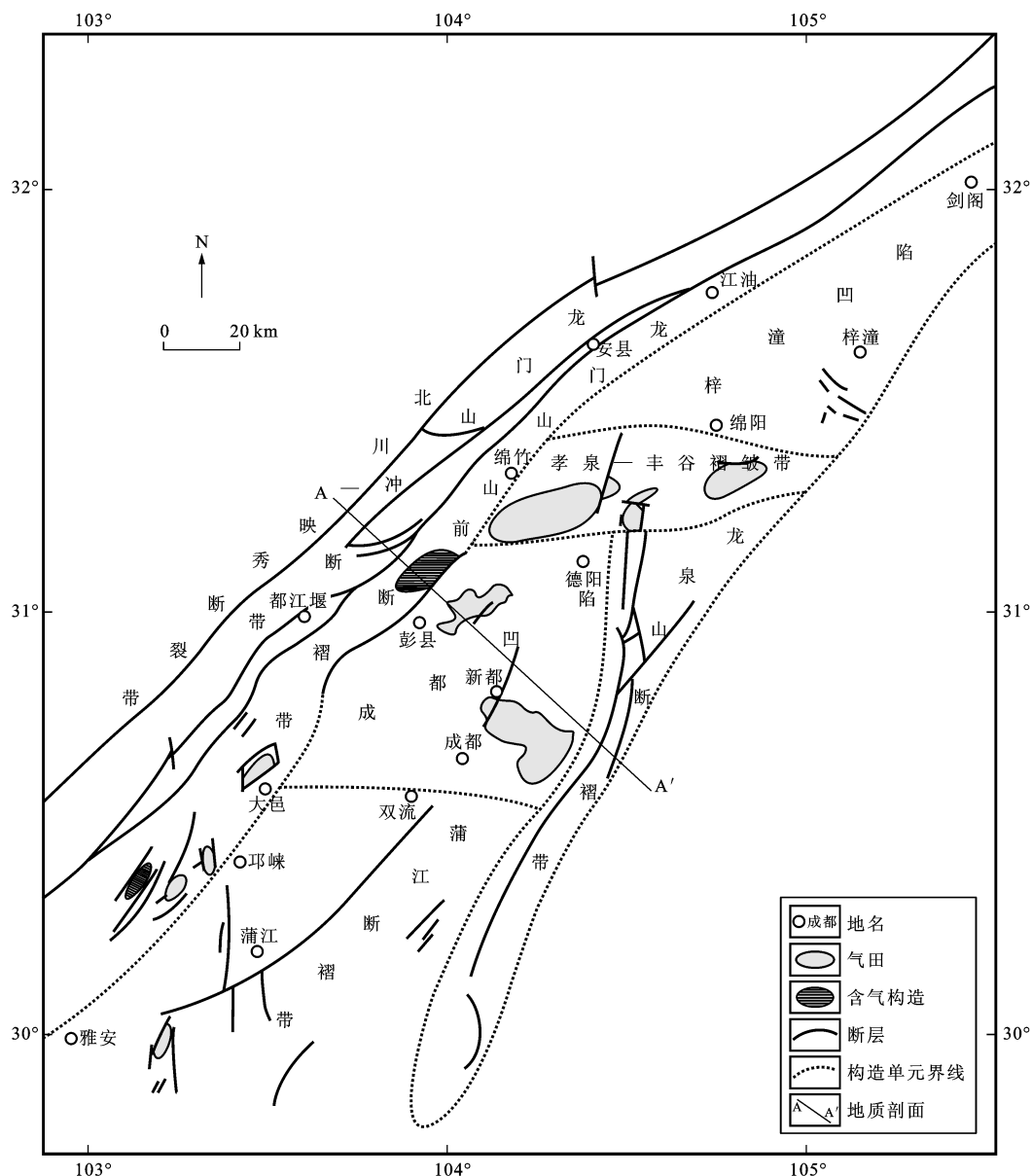


图1 四川盆地西部主要构造纲要

Fig.1 Simplified Map Showing Major Structural Features in the Western Sichuan Basin

一带,其中古近系厚 400~1 000 m,新近系一般厚 0~150 m。

从图 3 可以看出,从晚三叠世开始,四川盆地陆相碎屑岩层系的沉降和沉积中心发生了有规律的迁移,这可能与盆地周缘造山带隆升时间和速率的差异有关。例如,龙门山造山带在晚三叠世时比较活跃,川西前陆盆地的沉降中心和沉积中心基本一致。至早、中侏罗世时,大巴山造山带趋于活跃,沉降中心和沉积中心又迁移至川东北前陆盆地。

3 层系演化阶段划分

受周围地块消减、俯冲、碰撞和造山作用影响,四川盆地西部陆相碎屑岩层系主要经历了印支期、

燕山期和喜山期等多期构造事件(图 2)。这些发生在不同时期并具有不同强度的构造事件对陆相碎屑岩层系的沉积和剥蚀过程产生了重要影响,形成了多个区域或局部不整合,同时也影响了油气的运移、聚集和保存过程。

从晚古生代开始,四川盆地进入克拉通内裂陷盆地演化阶段,盆地北部及秦巴地区以裂陷带发育为特征^[29]。泥盆纪—石炭纪受加里东期和海西早期运动的影响,四川盆地在较长的一段时期内都处于隆起状态,故该时期沉积在盆地内部大面积缺失,仅分布于盆缘地区,沉积格局具有继承性,但盆地西部和东部地区差异较大。四川盆地西部地区的泥盆系和石炭系主要夹于两条基底断裂带之间,地层发

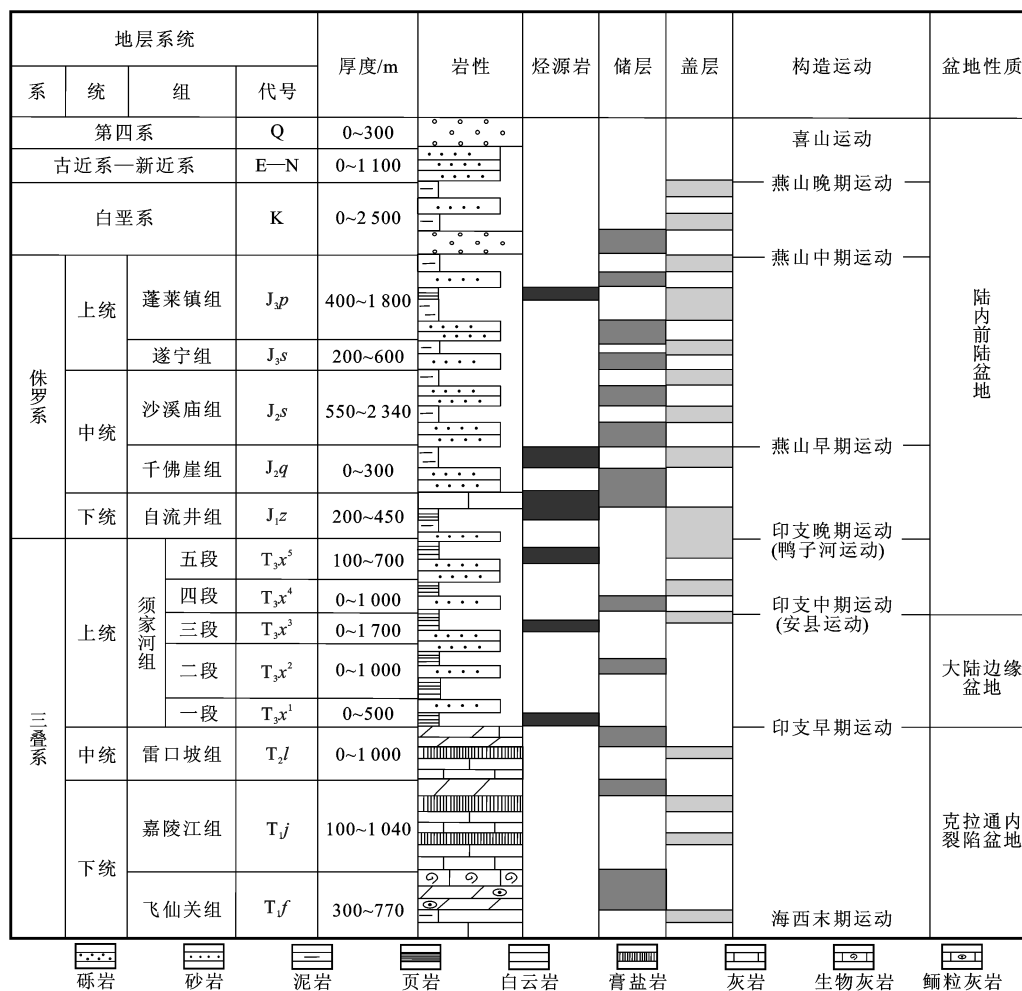


图 2 陆相碎屑岩层系发育特征、主要构造事件与盆地性质

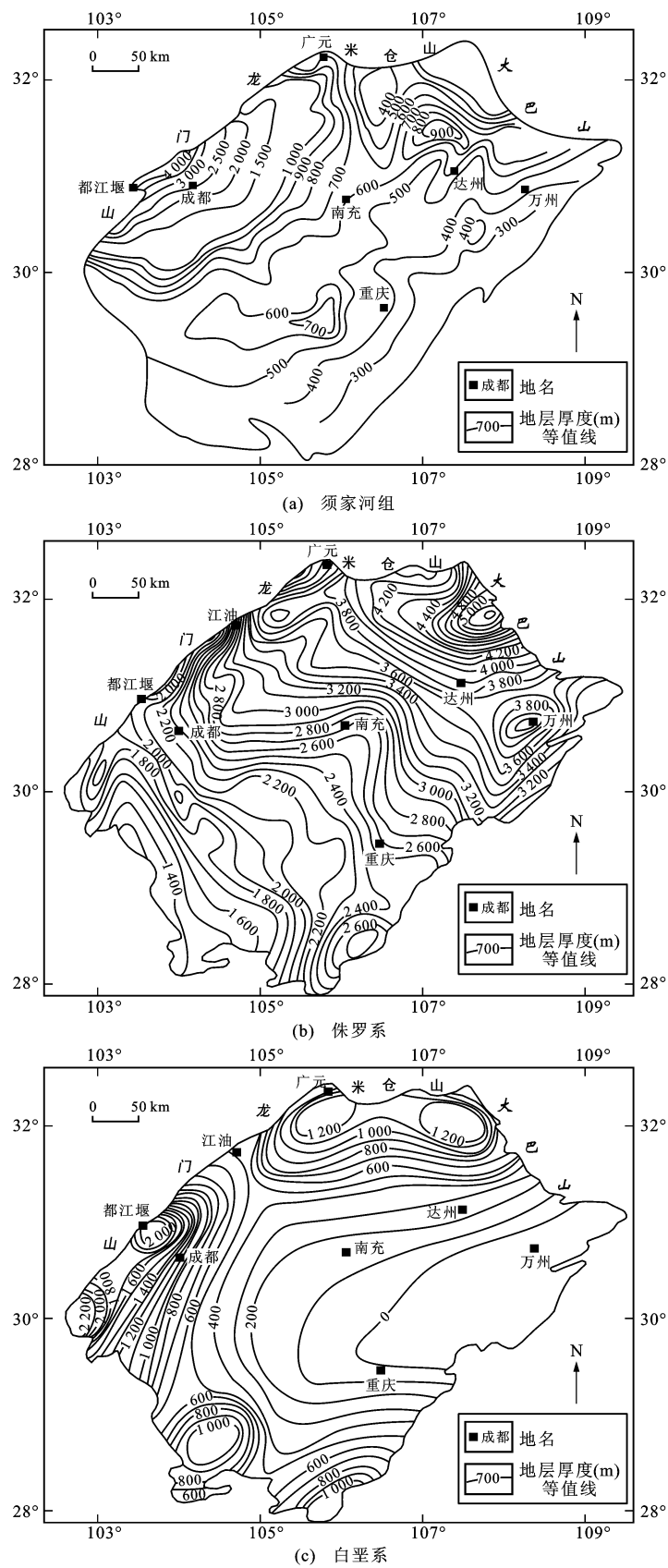
Fig. 2 Stratigraphic Column, Tectonic Events and Basin Types of the Continental Clastic Rocks

育齐全,西为松潘—甘孜海,海侵方向来自盆地西部;而四川盆地东部地区处于鄂西海西侧,由于海水西侵不断扩大,以地层超覆型沉积为主,基底断裂活动不强烈,沉降缓慢,地层发育不齐全。二叠系主要为广海相碳酸盐岩沉积,并由于峨眉地裂运动在晚二叠世达到高潮,上扬子地台西南缘发育陆内裂谷,后期朝 NE 向克拉通内部发展,并伴随大面积玄武岩喷发。

发生于中三叠世末的印支早期运动使上扬子地区结束了自震旦纪以来大规模海域分布的历史,特提斯海水逐渐退出四川盆地,盆地由“海盆”逐渐转变为“陆盆”,扬子地台西缘开始发育大陆边缘盆地[图 4(d)]。此时,四川盆地内部古地形呈东高西低形态,中三叠统雷口坡组遭受不同程度的剥蚀。须一段—须三段沉积期,四川盆地西部地区一直处于伸展背景的大陆边缘拗陷演化阶段,以海相和海陆过渡相沉积为主,地层厚度向西逐渐加厚,底部为一套浅海陆棚相泥岩和粉砂岩[图 4(c)]。随着松

潘—甘孜地块与扬子地块发生俯冲、碰撞,四川盆地西侧的松潘—甘孜小洋盆消亡,盆地西部地区在印支早期形成的大陆边缘盆地开始消亡。安县运动^[30]期间,龙门山造山带的隆升和逆冲推覆作用促使四川盆地全面结束海相沉积,标志着扬子地台西缘盆山转换的开始,盆地西部地区开始进入前陆盆地演化阶段[图 4(b)]。因此,发生于须三段和须四段沉积期之间的安县运动是四川盆地西部地区大陆边缘盆地和前陆盆地相互转换的关键变革期,导致须家河组下部(须一段—须三段)与上部(须四段—须五段)的形成环境发生了根本性改变。

喜山运动是四川盆地遭受最晚同时也是最强烈的一次构造运动。这次运动使白垩系和新生界都遭受了大量剥蚀,盆地内部大量出露侏罗系—白垩系,仅在局部地区出露新生界。在四川盆地西部地区南部灌口地区可见古近系与白垩系、新近系、古近系之间呈角度不整合接触。在龙门山前缘也普遍可见大邑砾岩(沉积时代为早更新世)普遍发生变形,其产



图件引自文献[31],有所修改

图 3 陆相碎屑岩层系分布

Fig. 3 Distributions of the Continental Clastic Rocks

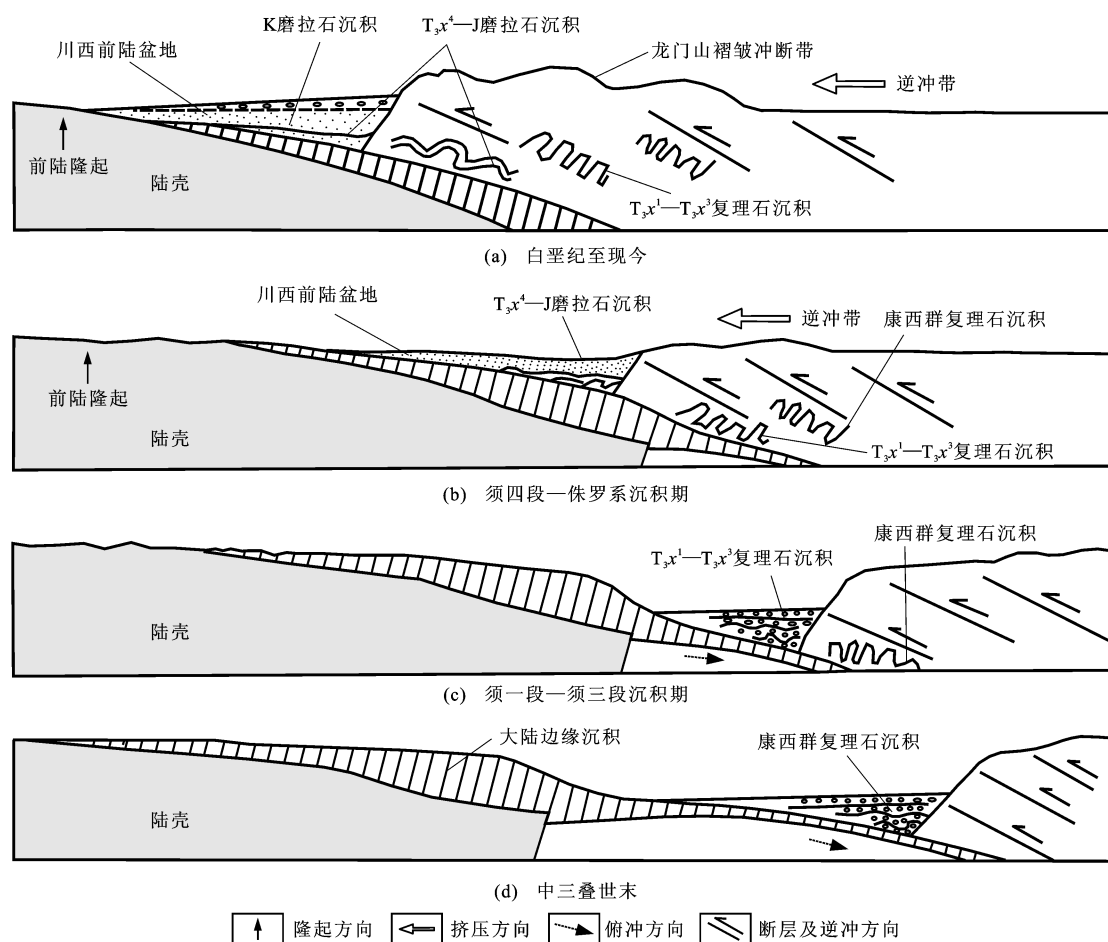


图 4 陆相碎屑岩层系演化阶段

Fig. 4 Schematic Maps Showing Evolution Stages of the Continental Clastic Rocks

状从较平缓、近直立到倒转都有,与下伏地层为低角度不整合,与上覆中更新统呈明显的角度不整合接触,表明四川盆地西部地区在早、中更新世期间发生了强烈的构造变形,演变为现今构造面貌并最终定型[图 4(a)]。

4 层系变形特征

由于受龙门山造山带强烈逆冲推覆作用的影响,龙门山山前地区构造变形强烈,发育多条大型逆冲断裂带,往盆内变形强度逐渐减弱,整体表现出一定的横向分带性(图 5)。这种构造变形的横向分带性也控制了圈闭发育的分带性。例如,龙门山山前发育 NE 向的龙门山冲断带和龙门山山前断褶带,与变形最强烈的龙门山冲断带相比,龙门山山前断褶带变形强度适中,局部构造相对完整,保存条件较好,是主要的富气带(图 1)。构造变形微弱的成都凹陷内发育了大量岩性圈闭,近年在侏罗系获得了重要勘探突破,发现了马井、新都、洛带和什邡等多个气田。

四川盆地西部陆相碎屑岩层系的构造变形以挤

压冲断、褶皱和滑脱变形为主,发育叠瓦冲断带、背冲断块、断层相关褶皱、飞来峰等多种不同类型的构造样式(图 6)。

叠瓦冲断带由一系列同向倾斜的冲断层组成,向下收敛于主断裂或主滑脱带上,构成叠瓦扇,主要分布在龙门山山前马角坝—通济场—双石断裂带以西地区。受龙门山造山带逆冲推覆作用影响,山前发育多条朝 NW 向倾斜的大型断裂带,并在三叠系嘉陵江组和雷口坡组中明显变缓,往深处在中深层次滑脱带^[20]内汇聚为一条大型平缓的逆冲断裂带[图 6(a)]。

背冲断块的形成是由于主逆冲断裂沿下滑脱面向上逆冲,其上盘同时形成一条反向冲断层,这两条断裂及其所夹持的地层构成背冲断块[图 6(b)、(c)]。位于龙门山山前断褶带中南部的大邑构造就是一个位于断弯褶皱上盘的背冲断块构造。该构造是由一条向东南逆冲推覆的主断裂与一条相伴生的反冲断裂所构成,主断裂在中三叠统雷口坡组含膏盐岩层系中明显变缓,表明雷口坡组在该构造的形

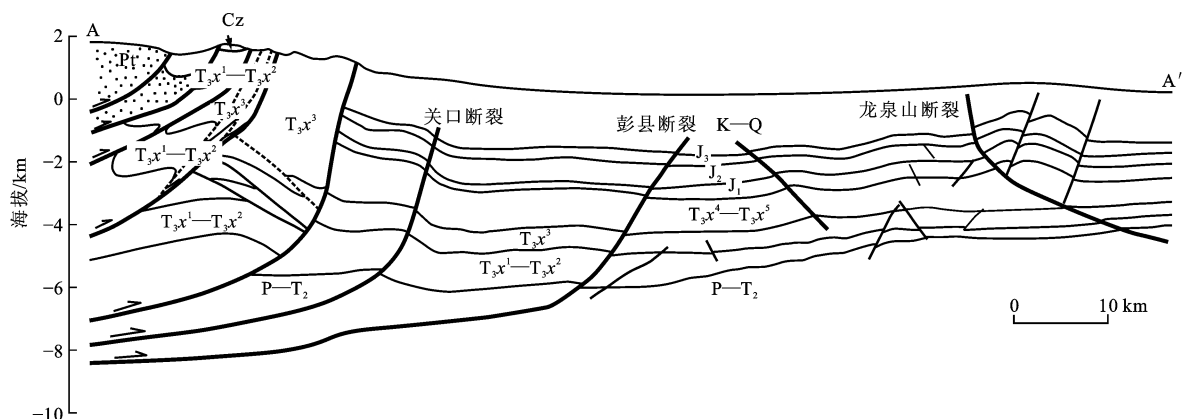


图5 四川盆地西部NW—SE向A-A'地质剖面

Fig. 5 NW-SE Geological Section A-A' in the Western Sichuan Basin

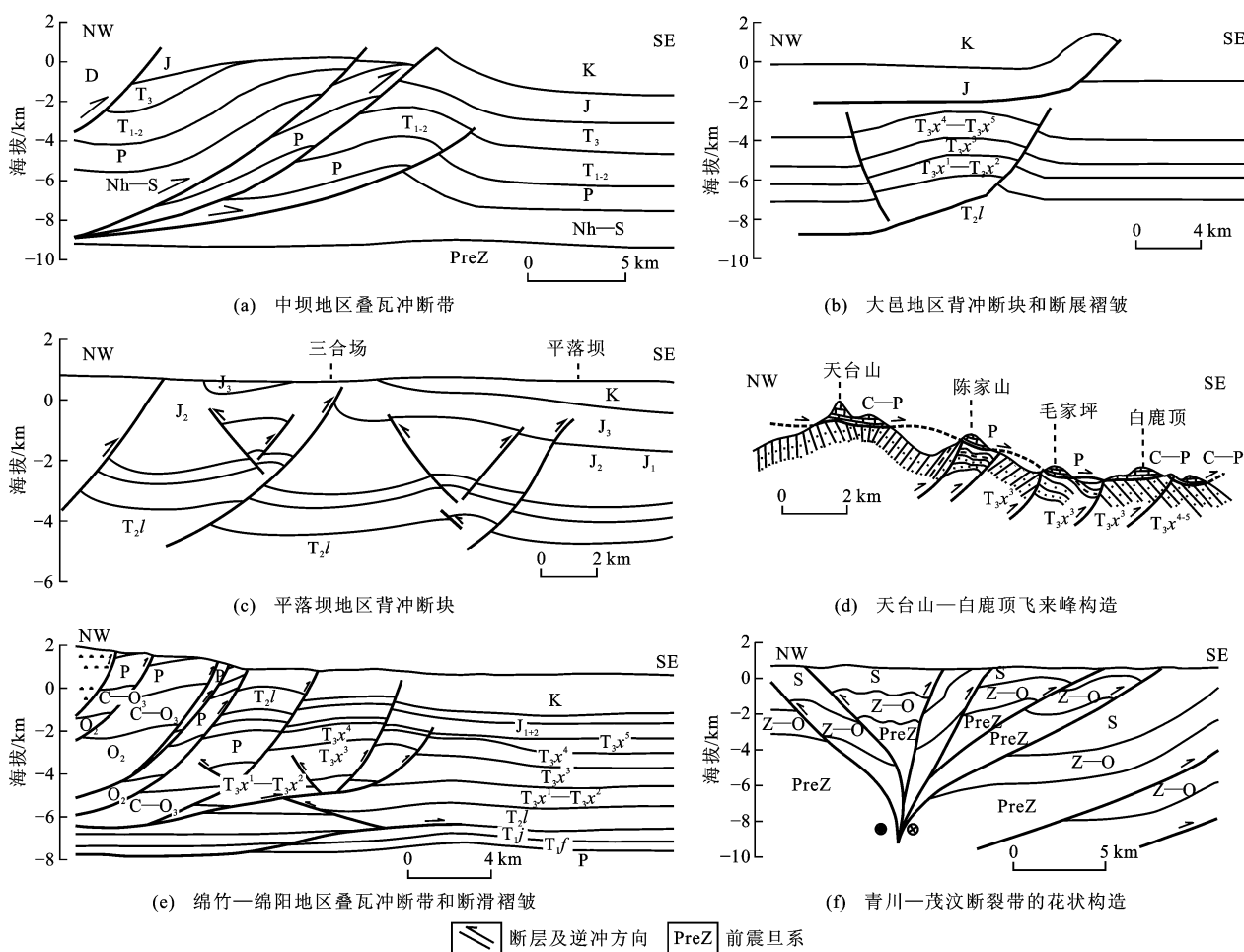


图6 陆相碎屑岩层系主要构造样式

Fig. 6 Main Structural Styles of the Continental Clastic Rocks

成过程中起到了重要的滑脱作用[图6(b)]。

飞来峰是龙门山地区常见的一类构造变形样式,其平面形态多为透镜状,不同地区的飞来峰规模差别较大,其下伏系统地层也有差异^[32]。龙门山地区的飞来峰构造可能兼具“滑覆”与“推覆”成因,主要形成于喜山期^[32-33],其前端多表现为逆冲推覆,而

后端多表现为正断层,断层两盘的岩性和产状明显不同[图6(d)]。

断层相关褶皱是四川盆地西部地区一类重要的构造变形样式。下盘断坡上的位移量沿断层逐渐减小,在断层端点位移量为0,所有位移均被褶皱变形吸收,从而在断层端点处形成断展褶皱,如大邑构造

的浅层变形样式就是一个典型的断展褶皱[图 6(b)]。断滑褶皱是发育在滑脱层之上的挤压背斜,它的形成将顺层断层的位移传递到上盘地层的褶皱之中,如绵竹—绵阳地区的陆相碎屑岩层系沿雷口坡组底面的滑脱层发生褶皱变形,而形成断滑褶皱[图 6(e)]。

除强烈的冲断和褶皱变形外,四川盆地西部地区(尤其是龙门山山前地区)的大型断裂还具有一定走滑性质^[34-36],不仅表现出山脊错断、河道错断、断层偏转等地貌特征^[34],而且在部分剖面上表现出明显的花状构造特征[图 6(f)]^[35]。总体上,龙门山山前地区的走滑活动具有从北往南逐渐增强的趋势,往南至四川盆地西南部山前地区,则表现出明显的走滑变形特征,主走滑断层近于直立,次一级压扭性断面较缓。

5 结 语

(1)四川盆地较厚的陆相碎屑岩层系主要分布在盆地西部和东北部。受盆地周缘造山带隆升时间和速率差异的影响,陆相碎屑岩层系的沉积中心发生了有规律的迁移,从晚三叠世时的川西前陆盆地迁移至早、中侏罗世时的川东北前陆盆地。

(2)四川盆地西部陆相碎屑岩层系遭受了印支期、燕山期和喜山期等多期构造事件的影响,盆地性质也随之从陆相碎屑岩层系沉积前的克拉通内裂陷盆地转变为晚三叠世早期的大陆边缘盆地,并最终演变为现今的陆内前陆盆地。

(3)四川盆地西部陆相碎屑岩层系构造变形以逆冲推覆和褶皱变形为主,兼具弱走滑作用,主要发育叠瓦冲断带、背冲断块、断层相关褶皱、飞来峰等多种构造样式,并表现出一定的横向分带性和纵向层次性,同时还控制了圈闭发育的分带性。

中国石化勘探开发研究院郑和荣、胡宗全、尹伟教授级高级工程师,黄泽光、方成名、高金慧高级工程师等对本文提供了指导与帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献:

References:

- [1] MA Y S, GUO X S, GUO T L, et al. The Puguang Gas Field: New Giant Discovery in the Mature Sichuan Basin, Southwest China[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(5): 627-643.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
- MA Yong-sheng, CAI Xun-yu, ZHAO Pei-rong, et al.

Distribution and Further Exploration of the Large-medium Sized Gas Fields in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.

- [3] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.
- ZOU Cai-neng, DU Jin-hu, XU Chun-chun, et al. Formation, Distribution, Resource Potential and Discovery of the Sinian-Cambrian Giant Gas Field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [4] 李 君, 吴晓东, 杨柏松, 等. 中国天然气聚集与分布新认识及有利勘探区带预测[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(2): 137-143.
- LI Jun, WU Xiao-dong, YANG Bai-song, et al. New Understandings of Natural Gas Accumulation and Distribution with Prediction of Favorable Exploration Plays in China[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(2): 137-143.
- [5] 魏国齐, 张春林, 张福东, 等. 中国大气田勘探领域与前景[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 25-34.
- WEI Guo-qi, ZHANG Chun-lin, ZHANG Fu-dong. Exploration Domain and Prospect of Giant Gas Fields in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 25-34.
- [6] 黄 东, 杨 光, 杨天泉, 等. 四川盆地中三叠世盐盆分布与演化特征研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(2): 37-42.
- HUANG Dong, YANG Guang, YANG Tian-quan, et al. Triassic Leikoupo Salt Distribution and Evolution in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(2): 37-42.
- [7] 郑和荣. 中国中西部四大盆地碎屑岩油气地质与勘探技术新进展[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 497-505.
- ZHENG He-rong. New Advances in Petroleum Geology and Exploration Techniques of Clastic Reservoirs in the Four Large-sized Basins in Central-western China[J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(4): 497-505.
- [8] 易士威, 林世国, 杨 威, 等. 四川盆地须家河组大气区形成条件[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 1-8.
- YI Shi-wei, LIN Shi-guo, YANG Wei, et al. Condition of Xujiahe Formation Large Gas Province Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 1-8.
- [9] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 288-299.

- SHEN Chuan-bo, MEI Lian-fu, XU Zhen-ping, et al. Architecture and Tectonic Evolution of Composite Basin-mountain System in Sichuan Basin and Its Adjacent Areas[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(3): 288-299.
- [10] 刘树根, 邓 宾, 李智武, 等. 盆山结构与油气分布: 以四川盆地为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 621-635.
- LIU Shu-gen, DENG Bin, LI Zhi-wu, et al. The Texture of Sedimentary Basin-orogenic Belt System and Its Influence on Oil/Gas Distribution: A Case Study from Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 621-635.
- [11] 张艳妮, 李荣西, 刘海青, 等. 四川盆地北缘大巴山前陆构造中—新生代构造隆升史[J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(1): 230-238.
- ZHANG Yan-ni, LI Rong-xi, LIU Hai-qing, et al. Mesozoic-Cenozoic Tectonic Uplift History of Dabashan Foreland Structure in the Northern Rim of Sichuan Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(1): 230-238.
- [12] 谷志东, 李宗银, 袁 苗, 等. 四川盆地及其周缘晚震旦世—早寒武世早期区域抬升运动对岩溶储层发育的影响[J]. *天然气工业*, 2014, 34(8): 37-45.
- GU Zhi-dong, LI Zong-yin, YUAN Miao, et al. Influences of Regional Uplifting During the Late Sinian-Early Cambrian on the Development of Karst Reservoirs in the Sichuan Basin and Its Peripheral Area[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(8): 37-45.
- [13] BURCHFIEL B C, CHEN Z L, LIU Y P, et al. Tectonics of the Longmen Shan and Adjacent Regions, Central China[J]. *International Geology Review*, 1995, 37(8): 661-735.
- [14] 郑荣才, 朱如凯, 翟文亮, 等. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式[J]. *中国地质*, 2008, 35(2): 246-255.
- ZHENG Rong-cai, ZHU Ru-kai, ZHAI Wen-liang, et al. Tectonic Evolution and Sequence Filling Patterns in the Western Sichuan Foreland-like Basin in the Upper Triassic Xujiahean Period[J]. *Geology in China*, 2008, 35(2): 246-255.
- [15] 陈 杨, 赵霞飞, 刘树根, 等. 四川盆地西部海相碎屑岩-陆相碎屑岩的转换过程[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(6): 697-705.
- CHEN Yang, ZHAO Xia-fei, LIU Shu-gen, et al. Transition from Marine Clastic Rocks to Nonmarine Clastic Rocks in the West of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2009, 36(6): 697-705.
- [16] 陈竹新, 贾 东, 魏国齐, 等. 川西前陆盆地中—新生代沉积迁移与构造转换[J]. *中国地质*, 2008, 35(3): 472-481.
- CHEN Zhu-xin, JIA Dong, WEI Guo-qi, et al. Meso-Cenozoic Sediment Transport and Tectonic Transition in the Western Sichuan Foreland Basin[J]. *Geology in China*, 35(3): 472-481.
- [17] 刘树根, 杨荣军, 吴熙纯, 等. 四川盆地西部晚三叠世海相碳酸盐岩-碎屑岩的转换过程[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 556-565.
- LIU Shu-gen, YANG Rong-jun, WU Xi-chun, et al. The Late Triassic Transition from Marine Carbonate Rock to Clastic in the Western Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2009, 30(5): 556-565.
- [18] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 川西龙门山冲断系构造样式和前陆盆地演化[J]. *地质学报*, 1994, 68(2): 100-118.
- LIU He-fu, LIANG Hui-she, CAI Li-guo, et al. Structural Styles of the Longmenshan Thrust Belt and Evolution of the Foreland Basin in Western Sichuan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(2): 100-118.
- [19] 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.
- JIN Wen-zheng, TANG Liang-jie, YANG Ke-ming, et al. Deformation and Zonation of the Longmenshan Fold and Thrust Zone in the Western Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1072-1080.
- [20] 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, 地球科学*, 2008, 38(增1): 30-40.
- TANG Liang-jie, YANG Ke-ming, JIN Wen-zheng, et al. Multi-level Decollement Zones and Detachment Deformation of Longmenshan Thrust Belt, Sichuan Basin, Southwest China[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2008, 38(S1): 30-40.
- [21] JIN W Z, TANG L J, YANG K M, et al. Segmentation of the Longmen Mountains Thrust Belt, Western Sichuan Foreland Basin, SW China[J]. *Tectonophysics*, 2010, 485(1/2/3/4): 107-121.
- [22] 于福生, 王彦华, 李晓剑, 等. 川西坳陷孝泉—丰谷构造带变形特征及成因机制模拟[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 45-53.
- YU Fu-sheng, WANG Yan-hua, LI Xiao-jian, et al. Deformation Characteristics and Genetic Simulation of Xiaoquan-Fenggu Structural Belt in West Sichuan Depression[J]. *Journal of Earth Sciences and Envi-*

- ronment, 2011, 33(1): 45-53.
- [23] 马德文, 邱楠生, 许威, 等. 四川盆地原油裂解气的有利地温场分布及其演化特征[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(2): 49-56.
- MA De-wen, QIU Nan-sheng, XU Wei, et al. Distribution and Evolution Characteristic of Favorable Geothermal Field for Oil Cracking Gas in Sichuan Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(2): 49-56.
- [24] 田成伟, 安显银, 罗清园, 等. 川东北元坝地区长兴组层序地层及沉积相分析[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(4): 36-42.
- TIAN Cheng-wei, AN Xian-yin, LUO Qing-yuan, et al. Analysis of Sequence Stratigraphy and Sedimentary Facies of Changxing Formation in Yuanba Area of Northeast Sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(4): 36-42.
- [25] 肖艳, 彭军, 张纪智, 等. 川西前陆盆地中段须家河组二段储层储集空间特征及演化[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 501-507.
- XIAO Yan, PENG Jun, ZHANG Ji-zhi, et al. Reservoir Spaces of the Second Section of Xujiahe Formation and Evolution in Middle Part of West Sichuan Foreland Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 501-507.
- [26] 孟万斌, 吕正祥, 刘家铎, 等. 川西坳陷孝泉一新场地区须家河组四段储层控制因素及预测地质模型[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 483-490.
- MENG Wan-bin, LU Zheng-xiang, LIU Jia-duo, et al. Reservoir Controlling Factors and Geological Prediction Models of the 4th Member of the Xujiahe Formation in Xiaoquan-Xinchang Area, the Western Sichuan Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(4): 483-490.
- [27] 谢刚平, 叶素娟, 田苗. 川西坳陷致密砂岩气藏勘探开发实践新认识[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 44-53.
- XIE Gang-ping, YE Su-juan, TIAN Miao. New Understandings of Exploration and Development Practices in Tight Sandstone Gas Reservoirs in Western Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 44-53.
- [28] LI Y J, SHAO L Y, ERIKSSON K A, et al. Linked Sequence Stratigraphy and Tectonics in the Sichuan Continental Foreland Basin, Upper Triassic Xujiahe Formation, Southwest China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 88(1): 116-136.
- [29] 魏国齐, 刘德来, 张林, 等. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 437-442.
- WEI Guo-qi, LIU De-lai, ZHANG Lin, et al. The Exploration Region and Natural Gas Accumulation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 437-442.
- [30] 王金琪. 安县构造运动[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(3): 223-234.
- WANG Jin-qi. Anxian Tectonic Movement [J]. Oil and Gas Geology, 1990, 11(3): 223-234.
- [31] 杨克明, 朱宏权, 叶军, 等. 川西致密砂岩气藏地质特征[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- YANG Ke-ming, ZHU Hong-quan, YE Jun, et al. The Geological Characteristics of Tight Sandstone Gas Reservoirs in Western Sichuan Basin [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [32] 吴山. 龙门山巨型滑覆型飞来峰体系与龙门山构造活动性[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 377-382.
- WU Shan. The Large-scale Gliding-type Klippe System in Longmen Mountains and Neotectonic Activity of the Longmen Orogen [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2008, 35(4): 377-382.
- [33] 韩建辉, 王道永, 李忠权. 龙门山中段清平飞来峰的构造变形特征及形成机制[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(3): 8-14.
- HAN Jian-hui, WANG Dao-yong, LI Zhong-quan. Structural Deformation and Genetic Mechanism of the Qingping Klippe in Central Longmen Mountains [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(3): 8-14.
- [34] 李勇, 周荣军, DENSMORE A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 40-51.
- LI Yong, ZHOU Rong-jun, DENSMORE A L, et al. Geomorphic Evidence for the Late Cenozoic Strike-slipping and Thrusting in Longmen Mountain at the Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 40-51.
- [35] JIA D, WEI G Q, CHEN Z X, et al. Longmen Shan Fold-thrust Belt and Its Relation to the Western Sichuan Basin in Central China: New Insights from Hydrocarbon Exploration [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(9): 1425-1447.
- [36] ZHANG P Z. A Review on Active Tectonics and Deep Crustal Processes of the Western Sichuan Region, Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 2013, 584: 7-22.