



地质力学学报  
Journal of Geomechanics  
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊  
CSCD 来源期刊（核心库）

## 《地质力学学报》预出版论文

论文题目：川西坳陷中段构造特征及变形定量分析

作者：龙毅，汪仁富，段文燊，孔选林，丁蔚楠，王淳，周小荣，  
邱建华

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026042

投稿时间：2026-04-03

录用时间：2026-06-17

预出版时间：2026-06-26

### 预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

# 川西坳陷中段构造特征及变形定量分析

龙毅<sup>1</sup>, 汪仁富<sup>1</sup>, 段文燊<sup>1</sup>, 孔选林<sup>1</sup>, 丁蔚楠<sup>1</sup>, 王淳<sup>1</sup>, 周小荣<sup>1</sup>, 邱建华<sup>2</sup>

LONG Yi<sup>1</sup>, WANG Renfu<sup>1</sup>, DUAN Wenshen<sup>1</sup>, KONG Xuanlin<sup>1</sup>, DING Weinan<sup>1</sup>,  
Wang Chun<sup>1</sup>, ZHOU Xiaorong<sup>1</sup>, QIU Jianhua<sup>2</sup>

1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川成都, 610031

2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京, 102212

1. SINOPEC Southwest Oil and Gas Company, Exploration and Development Research Institute, Chengdu, 610031, China

2. SINOPEC Exploration and Production Research Institute, Beijing, 102212, China

## Structural Characteristics and Quantitative Deformation Analysis of the Central Segment of the Western Sichuan Depression

**Abstract:** The central segment of the Western Sichuan Depression, located on the western margin of the Sichuan Basin, has been influenced by the Longmen Shan orogenic belt and has experienced multiple phases of tectonic movement and superimposed modification, resulting in the formation of a complex deep-shallow dual-layer structural system. Based on high-precision three-dimensional seismic data from the central segment of the Western Sichuan Depression, this study conducts fine structural interpretation, selects profiles of typical buried detachment anticlines, and applies the area-depth-strain (ADS) method to perform quantitative analysis of multi-phase structural deformation. In combination with regional structural deformation characteristics, it systematically investigates the structural deformation mechanisms and basin-mountain coupling processes in the central segment of the Western Sichuan Depression. The results show that, bounded by the Middle-Lower Triassic gypsum-salt detachment layer, the central segment of the Western Sichuan Depression is vertically decoupled into a shallow frontal thrust-nappe system in the piedmont and a deep buried detachment deformation system within the basin. The structural deformation in the study area exhibits a segmented pattern along strike, with deep deformation weakening from south to north and shallow deformation strengthening from south to north. This segmentation results from the combined effects of heterogeneous compression of the orogenic belt, differences in basement structure, and spatial variations in the detachment layer. Combined with the ADS quantitative analysis results of detachment anticlines, this study suggests that the multi-phase deformation of detachment anticlines in the central segment of the Western Sichuan Depression displays a pulsed distribution pattern of “early Indosinian deep-level initiation (217 m), middle Indosinian shallow-level dominance (142 m), and late Indosinian overall waning ( $\leq 31$  m)”, quantitatively revealing an episodic pattern in which the basin-mountain compressional deformation was transferred from deep to shallow levels and from early to late stages. Meanwhile, the differences in shortening amounts between the deep and shallow deformation systems in anticlines A and B indicate a “staggered peak” response over time: the deep deformation system experienced significant shortening during the early Indosinian (anticline B shortening of 217 m), whereas the shallow deformation system responded most strongly to compression during the middle Indosinian (Anxian Movement), together forming a unique coupling style of “deep pre-existing folding–shallow thrust nappe”. The “vertical layering–lateral segmentation–multi-phase quantification” structural understanding system established in this study not only provides a quantitative structural basis for deep to ultra-deep

petroleum exploration in foreland basins, but is also of great significance for deepening the understanding of the basin-mountain coupling processes in the central segment of the Western Sichuan Depression.

**Keywords:** Western Sichuan Depression; detachment anticlines; area-depth-strain method; multiphase deformation; layered detachment; basin–mountain coupling; foreland basin

**摘要:**川西坳陷中段位于四川盆地西缘,受龙门山造山带的影响,经历了多期构造运动的叠加改造,形成复杂的深浅双层构造体系。本文依托川西坳陷中段的高精度三维地震资料进行精细构造解释,优选剖面对典型隐伏滑脱背斜采用面积深度法(Area-depth-strain: ADS)开展多期构造变形的定量分析,结合区域构造变形特征,系统探讨了川西坳陷中段的构造变形机制与盆山耦合过程。研究表明:川西坳陷中段以中下三叠统膏盐滑脱层为界,在垂向上解耦形成浅层山前冲断前锋推覆系统和深层盆地隐伏滑脱变形系统。研究区域的构造变形沿走向呈现深部自南向北减弱、浅部自南向北增强的分段格局,是造山带非均一性挤压、基底结构差异及滑脱层空间变化共同作用的结果。结合滑脱背斜的ADS定量分析结果,研究认为川西坳陷中段的滑脱背斜的多期变形呈现“印支早期深部先行(217 m)、印支中期浅层主体(142 m)、印支晚期整体萎缩( $\leq 31$  m)”的脉冲式分配格局,定量揭示了盆山挤压变形由深至浅、由早至晚分阶段传递的幕式规律。同时,背斜A和B中深浅变形系统的缩短量差异显示深浅两套变形系统在时间上呈现“错峰”响应特征:深部变形系统在印支早期发生较大缩短(背斜B缩短量217 m),而浅部变形系统对印支中期(安县运动)挤压响应最为强烈,共同构成了“深部先存褶皱-浅部逆冲推覆”的独特耦合样式。本研究建立的“垂向分层—横向分段—多期定量”构造认识体系,不仅为前陆盆地深层—超深层油气勘探提供了定量构造依据,也对深入理解川西坳陷中段的盆山耦合过程具有重要意义。

**关键词:**川西坳陷;滑脱背斜;面积深度法;多期变形;分层滑脱;盆-山耦合;前陆盆地

## 0 引言

川西坳陷位于四川盆地西部,主体为晚三叠世以来发育形成的前陆盆地,蕴藏着极为丰富的天然气资源,是四川盆地最重要的天然气产区之一(刘和甫等,1994;秦胜飞等,2005;陈竹新等,2008;李智武等,2021;沈桐等,2021;李双建等,2023;赵爽等,2025)。受盆地周缘造山带影响,该坳陷自晚三叠世以来经历了印支、燕山和喜马拉雅多期次构造运动,构造演化过程复杂。前人针对川西坳陷构造变形的几何学与运动学特征开展了大量研究,但多聚焦于区域整体构造变形,或探讨构造演化及裂缝发育对油气成藏的影响(邓康龄等,2005;李智武等,2011;张世华等,2019;孟宪武等,2021;李莉妃等,2024;杨旭等,2025)。关于其发育过程,前人普遍认为,川西地区自晚三叠世开始发育周缘前陆盆地,自晚白垩世以来叠加发育再生前陆盆地(贾东等,2003;杨长清等,2008;何登发等,2020)。

近年来,随着川西地区地震资料品质的提升,前人开始对该坳陷的构造变形过程进行精细厘定。例如,周小军等(2015)通过断裂期次分析指出,自印支中期(须家河组二段—四段)以来,受龙门山造山活动影响,川西地区开始沿龙门山前发育北东向构造。郑娜等(2024a)针对龙门山中段印支期不整合的研究发现,在印支中期第一幕小塘子组沉积末期,龙门山山前已开始沿三叠系页岩层发育滑脱层,构造变形向盆地方向传递。在上述精细厘定工作之外,更多已有研究成果主要基于区域构造建模与构造平衡恢复,定性或定量地分析川西坳陷的整体构造演化过程(范小林等,2002;陈伟等,2009;李智武等,2009;郭卫星等,2012;李文泳,2020;孟宪武等,2021);少数研究则通过褶皱三维建模与几何参数分析,探讨坳陷内断层相关褶皱的几何形态及构造演化期次(贾东等,2011;何建磊等,2022)。值得注意的是,大量钻井与地震资料显示,川西坳陷内发育成排的隐伏滑脱背斜。然而,对于其中段广泛发育的这些隐伏滑脱背斜,其多期构造变形的定量特征(如各期次的缩短量)至今缺乏系统约束。这一不足导致以下关键科学问题难以深入回答:川西坳陷中段的滑脱背斜在不同构造期次的变形量如何定量分配?多期叠加过程中,

滑脱层对深、浅构造层的应变解耦作用如何量化？

因此，本文在前人研究基础上，依托川西绵竹地区的高精度三维地震资料进行精细构造解释，依次选取三条典型剖面开展区域构造特征分析；并从中优选构造保存完整的剖面，采用面积深度法对典型隐伏滑脱背斜进行多期构造变形的定量分析，恢复各期次的缩短变形量，建立滑脱背斜的多期定量演化模型；进而结合区域构造特征，探讨川西坳陷中段的盆山耦合过程及其动力学意义。

## 1 区域地质概况

川西坳陷位于四川盆地西部，属于晚三叠世川西前陆盆地的前缘坳陷部分。该构造带西侧为龙门山造山带，东以龙泉山—巴中隐伏断裂为界，北至米仓山前缘，南至大凉山构造带。受西侧龙门山造山带的影响，川西坳陷整体呈北东向展布，主要发育北东向的断裂构造（郭正吾等，1996；贾东等，2003；李智武等，2009；魏国齐，2019）。根据川西坳陷“南北分段、东西分带”的构造特征，川西坳陷东西划分为西侧的龙门山前缘扩展变形带，东侧的川西北低平褶皱区和川西南低缓断褶区（李智武等，2009），南北向上可依次划分为北段、中段及南段，其新生代以来的构造变形强度存在显著的空间差异，呈现出由南向北逐渐减弱的特征（钟锺等，2004；熊亮等，2017）。综合考虑研究区域的地理位置和构造变性特征，本文的研究区域属于川西坳陷中段（图1），处于川西北低平褶皱区和川西南低缓断褶区的过渡区域，具有变形减弱，多期构造叠加的构造变形特征。

川西坳陷中段经历多期构造运动，在上扬子克拉通结晶基底上依次沉积震旦系、寒武系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和新生代地层（图2）。其中，川西坳陷中段共发育三套主要区域滑脱层，分别为深部的寒武系滑脱层、中部的中下三叠统嘉陵江组和雷口坡组膏盐层以及浅部的上三叠统须家河组含煤地层（刘和甫等，1994；鲁人齐，2011；郑娜等，2024b）。川西坳陷中段的地层按岩性可分为海相沉积地层、陆相沉积地层以及少部分海陆过渡相沉积地层。区域地层沉积相变化反映了自晚三叠纪以来，受西侧龙门山造山带的影响，四川盆地由早期的海相沉积转变为陆相沉积，由被动大陆边缘转变为前陆盆地（贾东等，2003；刘树根等，2003；李智武等，2021）。在川西坳陷的构造演化过程中，印支中晚期的构造事件深刻影响着研究区域的构造形态与地层结构，导致研究区域内广泛发育印支期不整合（刘树根等，2001；李林涛等，2010；郑娜等，2024a）。燕山运动时期，龙门山造山带持续隆升，在川西坳陷中段发育一些近东西向的构造，比如孝泉-新场构造带（于福生等，2011；孟宪武等，2021）。喜山运动时期，受青藏高原东部向东挤出的影响，龙门山造山带再次发生快速逆冲推覆，构造应力向盆地内部发生构造挤压传递，在川西坳陷中段发育一系列北北东向的逆冲构造带。

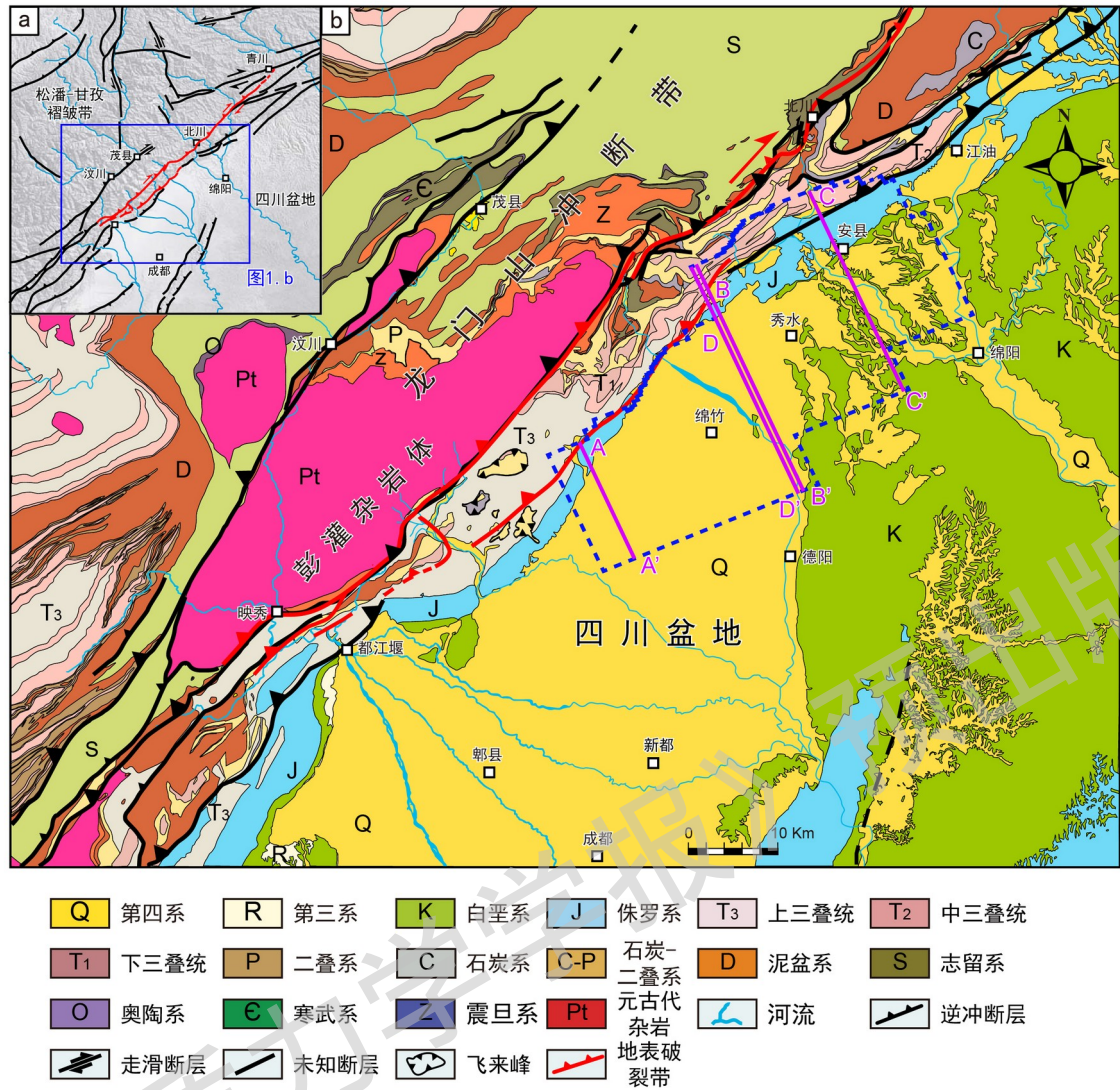


图1 川西坳陷中段地质简图（修改自 Feng et al., 2015；图中蓝色虚线为研究工区位置，紫色实线为测线位置）

Figure 1. Geological sketch map of the central segment of the Western Sichuan Depression (modified from Feng et al., 2015; the blue dashed line indicates the location of the study area, and the purple solid line indicates the location of the survey line)

地层				地层代号	岩性剖面	厚度 (m)	地质年代 (Ma)	构造运动	
界	系	统	组						
新生界	第四系			Q		0-380	2.5 23	喜山运动	
	新近系			N		0-300			
	古近系			E		0-800			
中生界	白垩系			K		0-2000	145	燕山运动	
		侏罗系	上统	蓬莱镇组	J3p				600-1400
				遂宁组	J2sn				340-500
		中统	沙溪庙组	J2s		600-2800			
	下统		白田坝组	J1b		30-100			
	三叠系	上统	须家河组	T3x		250-3000	201 208	印支运动	
			中统	雷口坡组	T2l				
		下统	嘉陵江组	T1j		900-1700			
			飞仙关组	T1f					
	古生界	二叠系	上统	P3		200-500	251	东吴运动	
中统			P2		200-500				
寒武系		Є		0-350	加里东运动				
远古界	震旦系		Z		200-1100	541	桐湾运动		
	前震旦系		AnZ			850	澄江运动		

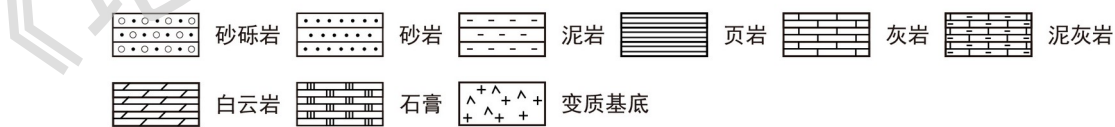


图2 川西坳陷中段地层柱状图

Figure 2. Stratigraphic column of the central segment of the Western Sichuan Depression

## 2 构造分区与典型剖面变形特征

以龙门山冲断带前缘的广元-大邑断层为界，研究区域沿应力方向可划分为西部的山前冲断带和东部的东前陆坳陷带。受区域滑脱层的影响，研究区域垂向上的构造变形可分为深浅两层变形系统，分别为浅层的山前冲断带推覆系统，深层的盆地隐伏滑脱断层相关褶皱及对冲变形系统。同时，受龙门山造山带的影响，研究区域的变形强度沿走向也同样呈现明显的分段性，其自南向北可依次划分为南部、中部及北部三个构造段。需要说明的是，该分区仅用于构造特征的描述与对比。

## 2.1 南部构造段

在拗陷内部，如图3（剖面A-A'）剖面所示，南段山前三叠系须家河组内部的须二段至须四段（ $T_3X^2-T_3X^4$ ）地层厚度呈现由山前往盆地方向减薄的趋势（图3）。同时，三叠系的须五段（ $T_3X^5$ ）地层与上覆的侏罗系白田坝组（J<sub>1b</sub>）地层之间形成明显的削截不整合接触关系，表明印支晚期的构造活动对拗陷内部的构造变形具有强烈影响。在盆地内部的凹陷深部隐伏带，深部断层沿着底部的寒武系滑脱层向造山带方向发生冲断变形，且三叠系的膏盐岩在深部断层顶部发生聚集增厚，发育低幅度隐伏滑脱背斜。在靠近山前的拗陷带，大体以三叠系的膏盐岩滑脱层（ $T_{1j}-T_{2l}$ ）为界，浅部在冲断带前缘发育以广元-大邑断层为主的逆冲构造。深部受基底断层和深部寒武系滑脱层的影响，在广元-大邑断层下方发育断层传播褶皱—鸭子河背斜（图3.c）。

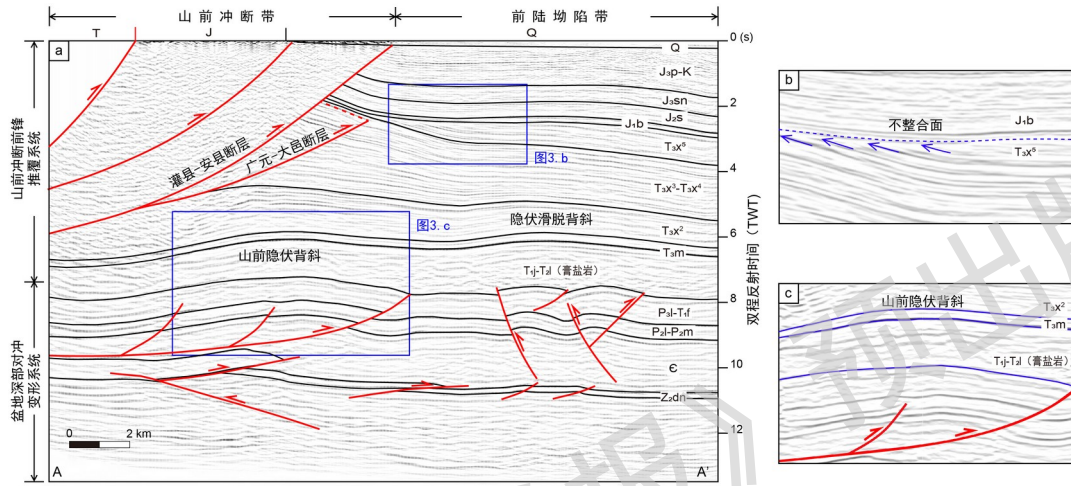


图3 研究区南部地震解释剖面A-A'（测线位置见图1）

Figure 3. Seismic interpretation profile A-A' of the southern segment of the study area (see Figure 1 for profile location)

## 2.2 中部构造段

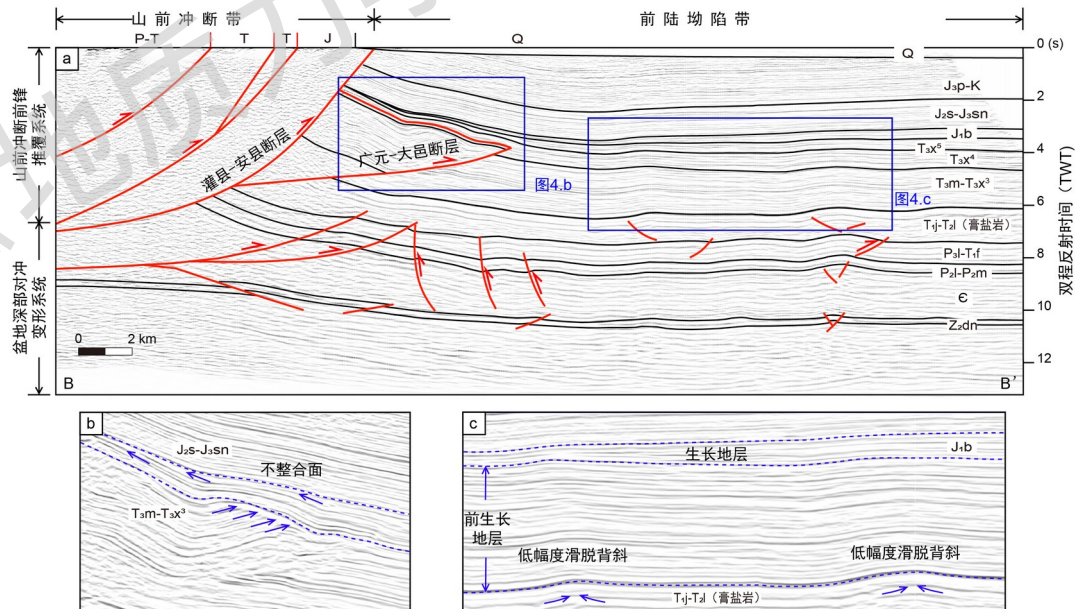


图4 研究区中部地震解释剖面B-B'（测线位置见图1）

Figure 4. Seismic interpretation profile B-B' of the central segment of the study area (see Figure 1 for profile location)

在研究区域中段，如图4（剖面B-B'）所示，拗陷内可见下伏地层三叠系须三段（ $T_3X^3$ ）被上

覆地层须四段削截，以及三叠系须五段被上覆地层侏罗系白田坝组削截，均呈角度不整合接触。表明在印支运动期间，尤其是在须家河组第四段沉积前，区域构造应力发生巨大改变，龙门山造山带向盆地方向发生强烈的逆冲挤压作用。位于冲断前锋的广元—大邑断层隐伏于第四系地层之下，影响区域内的地层沉积以及次级断裂的发育情况。隐伏于广元—大邑断层下方的断层，比如兴隆场断层等，制约山前隐伏背斜带的发育和展布情况，具控带、控圈断裂的特性。在盆地内部的前陆拗陷深部，沿深部的寒武系滑脱层发育断穿二叠系的深部断层，并向上收敛于三叠系的膏盐层。

### 2.3 北部构造段

与中段相似，研究区域北段拗陷内上三叠统须三段与须四段、须五段与侏罗系白田坝组均呈削截不整合接触。以龙门山冲断带前缘的广元—大邑断裂为界，构造带西侧沿三叠系膏盐岩发育叠瓦逆冲构造，冲断片呈叠瓦扇状向盆地方向楔入，构造带东侧沿深部寒武系向造山带方向发育一系列深部小幅度断层，并向上收敛于三叠系膏盐层。与其他两段相比，研究区域北段的广元—大邑断层的楔体规模呈现增大的趋势，表明龙门山冲断带向盆地方向的挤压作用在印支期由南向北逐渐增强。根据地震剖面，位于研究区域北段的隐伏滑脱背斜的幅度较小，深部对冲变形系统的能量减弱。

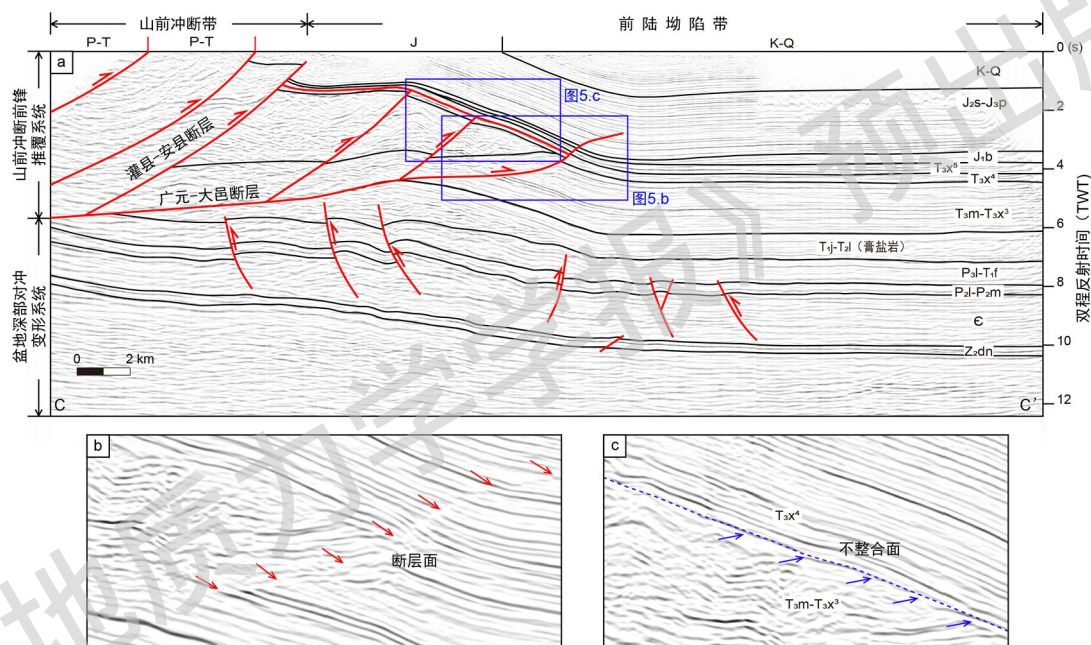


图5 研究区北部地震解释剖面 C-C' (测线位置见图1)

Figure 5. Seismic interpretation profile C-C' of the northern segment of the study area (see Figure 1 for profile location)

## 3 构造变形定量分析

### 3.1 面积深度法原理

面积深度法 (Area-Depth-Strain Method, ADS) 最早由 Epard and Groshong (1993) 提出，是一种通过计算褶皱地层的多余面积  $S$  与对应参考面 (深部滑脱面) 的距离  $H$  之间的线性关系来预测褶皱滑脱面的深度和滑移量的研究方法 (Epard and Groshong, 1993; Groshong and Epard, 1994)。该方法不仅可以实现变形期次和变形量的定量化分析，也适应于地层长度和厚度在变形前后不守恒的复杂构造变形情况。其主要通过将每一套地层的面积  $S$  和深度  $H$  进行坐标投影和线性拟合，最终计算坐标点关系线的斜率和截距。其中，截距代表深部实际滑脱面的深度，斜率代表地层滑移量 (图6)。

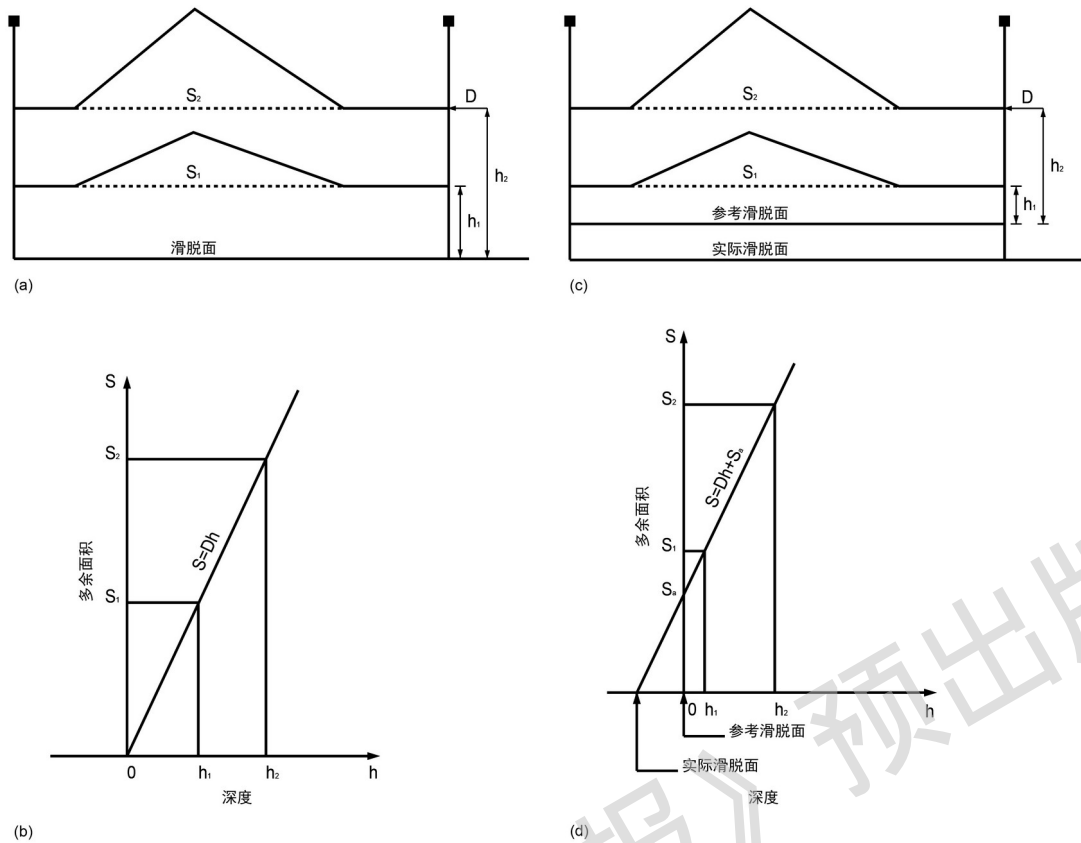


图 6 面积深度法示意图（修改自 Epard and Groshong, 1993）

Figure 6. Schematic diagram of the area-depth method (modified from Epard and Groshong, 1993)

在实际应用中，如果褶皱存在生长地层，其面积-深度投影结果会存在不同的斜率。在生长前地层中，每套地层的滑移量相等，故其面积-深度投影结果呈正相关关系。而生长地层是在构造变形过程中沉积的地层，每套生长地层都会有不同的滑移量，且滑移量向更年轻的地层减小，即生长地层的多余面积逐渐减小，面积-深度投影结果呈负相关关系。因此，面积深度法可以有效区分滑脱褶皱的生长地层和生长前地层，进而判断滑脱褶皱的活动期次。

### 3.2 滑脱背斜面积深度法计算

前文构造解释成果表明，研究区前陆拗陷带内广泛发育隐伏滑脱背斜。其中，南部构造带内的滑脱背斜毗邻冲断前锋的高角度不整合面，其 ADS 拟合结果受该界面影响显著，可靠性较低；北部构造带内的滑脱背斜变形幅度微弱，难以有效约束研究区的变形期次。基于此，本文选取中部构造带地震剖面上两个相邻的隐伏滑脱背斜（背斜 A 和背斜 B）进行 ADS 曲线分析（图 8）。背斜 A 更靠近龙门山造山带，为沿三叠系膏盐层滑脱的低幅度背斜；背斜 B 浅部亦沿三叠系膏盐层发育为较为对称的低幅度滑脱背斜，而其深部则发育沿寒武系地层滑脱的先存背斜。对这两个背斜的 ADS 投影结果进行对比分析，可有效区分深浅两套变形系统的缩短量差异，并深化对川西拗陷中段分层解耦机制的认识。

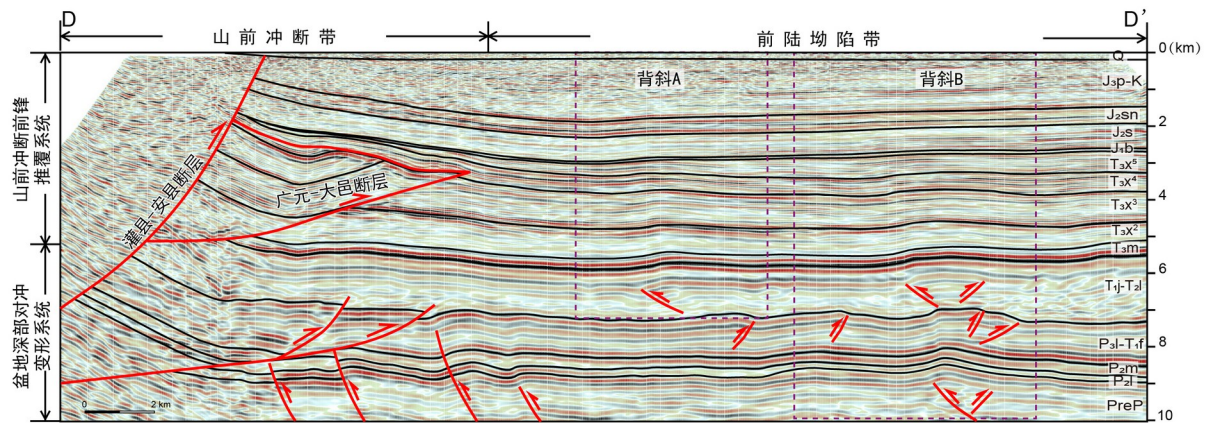


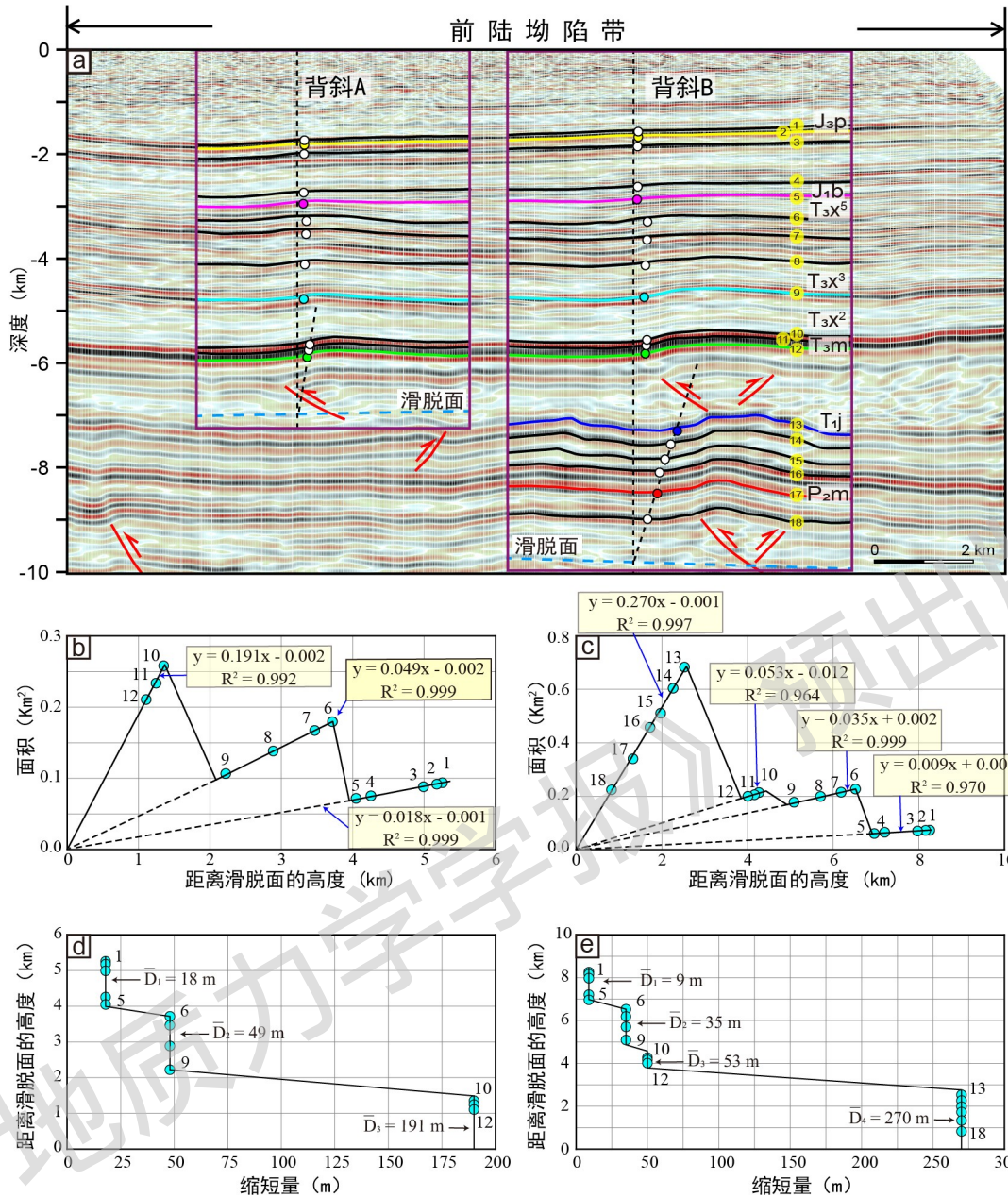
图7 滑脱背斜A和B的地震解释剖面D-D' (测线位置见图1)

Figure 7. Seismic interpretation profile D-D' of detachment anticlines A and B (see Figure 1 for line location)

ADS 投影结果显示 (图 8.a), 背斜 A 和背斜 B 的两套滑脱面分别位于三叠系和寒武系的软弱膏盐层中。二者的投影具有相似的变形期次 (图 8.b 和图 8.c), 具体表现为: 三叠系膏盐层之上的生长前地层在同一期构造活动中可拟合成一条直线, 且具有相同的位移量。在背斜 A 和背斜 B 中, 浅部生长地层发育在须二段和须五段地层中。须二段地层厚度由山前冲断带向前陆坳陷带减薄, 而须五段地层厚度则相反, 向前陆坳陷带增厚, 分别记录了龙门山前陆盆地从早期填平补齐到晚期挠曲沉降的构造转换过程。背斜 B 的深部生长地层发育在三叠系嘉陵江组和雷口坡组膏盐层中, 揭示其深部隐伏滑脱背斜在印支早期可能已经存在构造隆升, 这与龙门山前的马鞍塘组与雷口坡组之间的区域不整合相对应 (郑娜等, 2024a)。

进一步分析背斜 A 和背斜 B 中生长前地层的缩短量变化 (图 8.d 和图 8.e), 发现二者存在显著差异。背斜 A 的变形主要集中在须二段沉积期 (缩短量 142 m), 至须五段沉积期急剧减小至 31 m, 表明背斜 A 在早期快速隆起并基本定型, 后期构造活动较弱。相比之下, 背斜 B 在须二段和须五段沉积期的缩短量均较小 (分别为 18 m 和 26 m), 但在更早期的中下三叠统膏盐层沉积期发生了较大缩短 (217 m), 指示其深部隐伏滑脱背斜主要受寒武系膏盐层控制。上述缩短量变化差异揭示了川西坳陷中段深浅滑脱层导致深浅构造变形系统的变形强度在不同变形阶段存在明显分异。

综合背斜 A 和 B 的分析结果可知: 川西坳陷中段沿三叠系膏盐岩滑脱的背斜, 其变形起始于印支中期, 构造变形由造山带向盆地方向依次传递; 而深部隐伏滑脱背斜的变形可追溯至印支早期, 主要沿寒武系滑脱层传递构造变形。



a-背斜A和背斜B的地震反射剖面矢量图；b-背斜A的ADS投影结果；c-背斜B的ADS投影结果；d-背斜A的缩短量变化情况；e-背斜B的缩短量变化情况；

图8 背斜A和背斜B的面积深度分析结果

Figure 8. Area-depth analysis results of Anticline A and Anticline B

(a) Seismic profile of Anticline A and Anticline B; (b) ADS projection result of Anticline A; (c) ADS projection result of Anticline B; (d) Variation in shortening of Anticline A; (e) Variation in shortening of Anticline B;

### 3.3 区域构造演化过程

综合前文地震解释剖面与隐伏滑脱背斜的ADS投影结果，并结合前人研究成果，本次研究认为川西坳陷中段主要经历了印支早期构造反转、印支中期强烈变形、印支晚期抬升定型、燕山—喜山期叠加改造四个构造演化阶段（图9）：

#### (1) 印支早期

印支运动前，川西地区处于扬子西缘张裂大陆边缘的拉张构造背景，发育正断层和小型断陷

(陈竹新等, 2006; 时志强等, 2008; 许晨昊和陈伟, 2023)。印支运动早期, 受古特提斯洋闭合影响, 区域构造应力场由早期的拉张环境转变为挤压环境, 发生显著的构造正反转(陈颖莉等, 2008; 邹付戈和尹宏伟, 2009)。该期构造变动形成了中三叠统雷口坡组与上三叠统马鞍塘组之间的区域性不整合面, 该界面是晚三叠世龙门山前陆盆地的底部不整合面, 标志着扬子板块西缘由被动大陆边缘向前陆盆地转换(李勇等, 2011)。伴随区域构造抬升, 川西地区的沉积环境由海相碳酸盐岩沉积转变为海陆过渡相碎屑岩沉积(刘树根等, 2009a)。在强烈挤压构造作用下, 川西坳陷内早期形成的正断层发生反转, 并沿深部寒武系膏盐岩滑脱层形成深部先存背斜的雏形(如背斜B)(图9.a)。

#### (2) 印支中期

须二段沉积期间, 受龙门山造山带活动影响, 川西坳陷作为前陆盆地快速沉降, 地层厚度由山前向盆地方向逐渐减薄(郑荣才等, 2008; 戴朝成等, 2010; 陈洪德等, 2021)。该期构造事件中, 川西坳陷中段的部分滑脱背斜(如背斜A)沿三叠系膏盐层发生显著变形缩短(缩短量142 m), 表明其快速隆升变形主要发生于此阶段(图9.b)。

#### (3) 印支晚期

三叠纪晚期, 扬子板块与周缘地块再次碰撞, 导致龙门山山前挤压变形加剧(张岳桥等, 2011)。研究区发生区域隆升, 龙门山前须五段局部剥蚀或缺失, 造成三叠系须家河组与下侏罗统白田坝组之间形成明显的区域角度不整合。李勇等(2011)将该不整合面厘定为晚三叠世龙门山前陆盆地的底部不整合面。地震剖面显示龙门山冲断带的前缘发育叠瓦逆冲断层, 冲断片呈叠瓦扇状沿三叠系膏岩层向盆腹楔入(图9.c)。

#### (4) 燕山-喜山期

燕山期, 研究区普遍发生抬升剥蚀(李林涛等, 2010), 早期褶皱和断层变形加剧, 同时发育一系列新构造。浅部变形主要沿三叠系膏岩层向盆地传递, 山前形成叠瓦双重构造; 深部沿寒武系地层发育逆冲楔, 与坳陷带内逆冲构造构成对冲变形系统, 纵向上呈现双层构造变形特征。进入新生代, 受喜山运动影响, 龙门山造山带快速向盆地方向逆冲推覆, 导致浅部变形进一步向盆地传递, 形成一系列北北东向逆冲构造带(罗啸泉等, 2016)。研究区的构造变形持续加剧并趋于定型, 具体表现为主控断层断距增大, 次级断层数量增多(图9.d)。

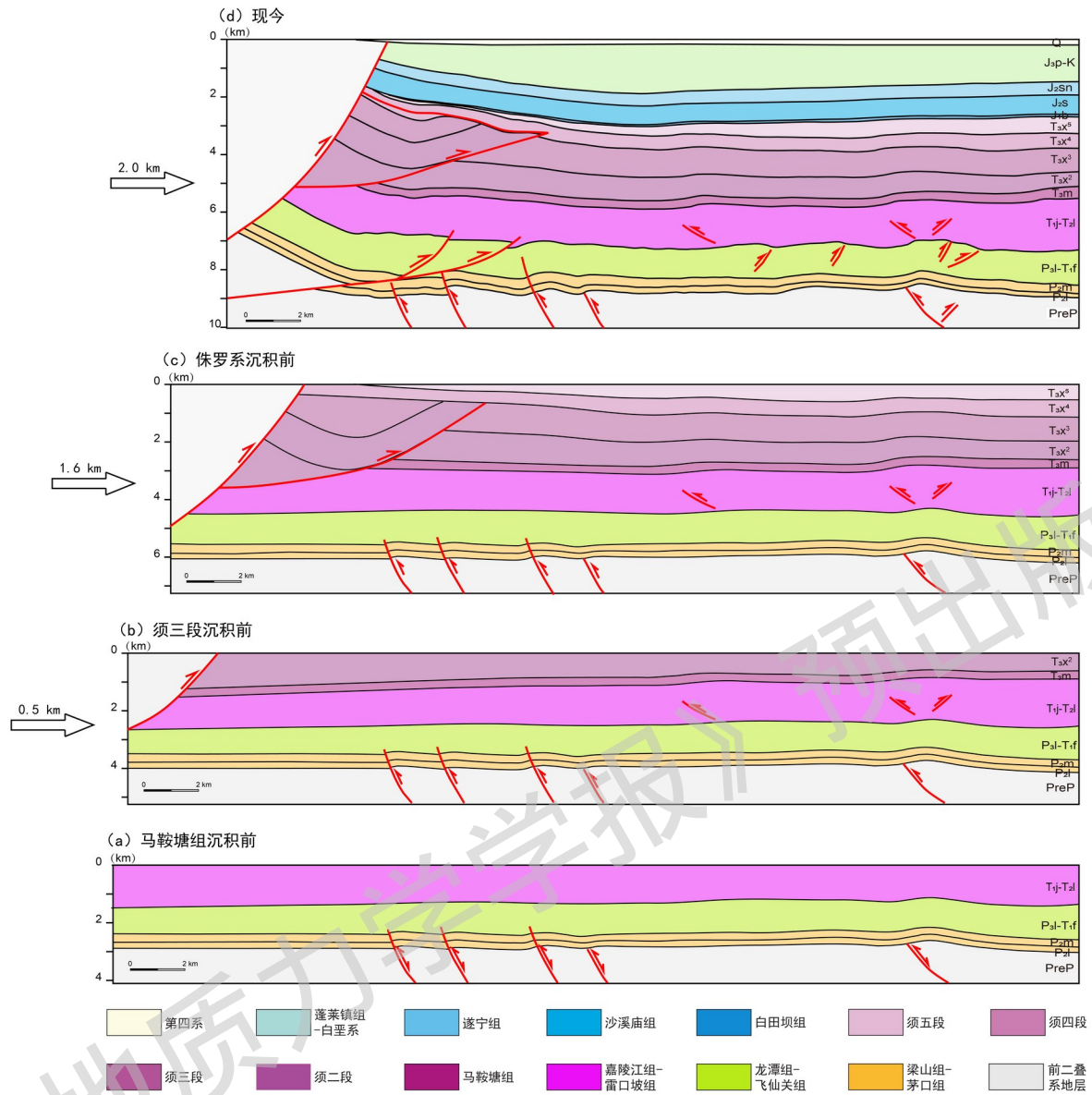


图 9 川西坳陷中段的构造演化示意图

Figure 9. Tectonic evolution diagram of the central segment of the Western Sichuan Depression

## 4 讨论

### 4.1 多期变形定量分配与深浅层应变解耦

前文的构造变形定量分析结果已揭示，川西坳陷中段隐伏滑脱背斜在纵向上保存了多期缩短变形记录，为定量回答“不同构造期次的变形量如何分配”与“滑脱层对深浅层应变的解耦如何量化”这两个核心问题提供了关键窗口。前人研究表明川西坳陷中段在印支期的多期变形叠加深刻影响了区域构造格局（李智武等，2009；Lu et al., 2014；郑娜等，2024b）。典型地震剖面揭示龙门山前广泛发育两期角度削截不整合——须三段与须四段之间、须五段与侏罗系白田坝组之间，分别对应区域内印支中期的安县运动与印支晚期的新场运动。基于面积深度法的投影结果，背斜 A 与背斜 B 的缩短量变化为上述变形期次提供了定量约束。

针对变形量的期次分配问题，背斜 A 的 ADS 投影结果直接响应了上述两期不整合的构造含义。其在须二段沉积期的缩短量高达 142 m，至须五段沉积期骤减为 31 m（图 8.d）。这一缩短量

的急剧衰减定量刻画了龙门山造山带由“强逆冲推覆”向“构造宁静—剥蚀夷平”的转换过程，反映出盆山耦合过程中前陆盆地从主动挠曲沉降向被动拗陷充填的转变过程。背斜 B 的分析则将变形序列进一步向早期延伸：其深部构造在中下三叠统膏盐层沉积期缩短量达 217 m，揭示川西拗陷中段在印支早期已存在显著的挤压变形，这与马鞍塘组与雷口坡组之间的区域不整合（郑娜等，2024a）相吻合。浅部变形系统对深部先存构造的继承与叠加，构成了“深部先存褶皱—浅部逆冲推覆”的时空叠合响应样式。综合两个背斜的定量分析结果，区域滑脱背斜的多期缩短呈现“印支早期深部先行（217 m）—印支中期浅层主体（142 m）—印支晚期整体萎缩（ $\leq 31$  m）”的脉冲式分配格局，定量揭示了盆山挤压变形由深至浅、由早至晚分阶段传递的幕式规律。

上述多期缩短量不仅在时间上存在明显差异，也在垂向结构上有响应差异。川西拗陷中段受控于深层寒武系膏盐岩与浅前三叠系膏盐岩两套区域滑脱层，二者的协同作用分别形成了浅层山前冲断前锋推覆系统和深层盆地隐伏滑脱变形系统。因滑脱层与上下地层之间的流变性质差异，强烈逆冲推覆背景下区域发生明显的垂向解耦变形（刘树根等，2009b；王振南等，2019；郑娜等，2024a；汪仁富等，2026）。滑脱背斜的定量分析结果揭示了深浅变形系统的响应差异：浅层系统对须二段沉积期的挤压响应最为强烈，深层系统则主要在中下三叠统沉积期集中缩短，后期增量微弱。以背斜 B 为例，其深部缩短 217 m，浅部须二段与须五段累计缩短仅 44 m，深浅缩短比高达 4.9，即约 83% 的深层位移被三叠系膏盐岩滑脱层吸收，浅部仅以低幅度褶皱微弱调节。这种基于面积深度法获取的深浅缩短量比值，将以往定性描述的“分层解耦”推进为定量表征，直接量化了多期叠加过程中滑脱层吸收与转换应变的效率。深浅系统在时间上的“错峰”与空间上的“叠置”，共同塑造了川西拗陷中段“深部先存褶皱—浅部逆冲推覆”的独特耦合样式。

#### 4.2 构造变形的横向分段及其盆山耦合动力学响应

地震剖面显示，川西拗陷中段沿走向存在显著的变形梯度差异。南部构造带以深部变形为主导：深部断层沿寒武系滑脱层向造山带方向冲断，于三叠系膏盐层顶部形成低幅度隐伏滑脱背斜（鸭子河背斜）；浅部则以广元—大邑断层为前锋构成逆冲构造，总体呈现“深强浅弱”的特点。中部构造带表现为深浅协调变形：深部断层沿寒武系滑脱层断穿二叠系，并向上收敛于三叠系膏盐层；浅部广元—大邑断层隐伏于第四系之下，发育兴隆场等隐伏断层，形成深部断层传播褶皱与浅部逆冲推覆的构造组合，应变分配均衡。北部构造带以浅部变形为主：西侧沿三叠系膏盐岩发育规模较大的叠瓦逆冲构造，冲断片呈叠瓦扇状向盆地楔入；东侧仅沿深部寒武系滑脱层发育一系列小幅度断层，隐伏滑脱背斜幅度小且深部对冲系统能量减弱，呈现“浅强深弱”的特点。总体而言，研究区深部构造变形自南向北逐渐减弱，浅部构造变形自南向北逐渐增强。

川西拗陷的分段变形可能受控于龙门山造山带的冲断强度、基底结构差异以及滑脱层分布（钟锴等，2004；陈竹新等，2005；李智武等，2009；甯濛等，2015；李智武等，2021）。前人研究指出，龙门山冲断带自印支期以来，向盆内的缩短量由南向北逐渐增强（陈竹新等，2005），川西地区新生代变形则受德阳—绵阳一带刚性基底阻挡而呈现南强北弱的趋势（钟锴等，2004）。同时，中下三叠统膏盐岩层具有南厚北薄的展布趋势（金之钧等，2006；李智武等，2009）。值得注意的是，龙门山冲断带缩短强度的北强南弱，主要控制了浅层叠瓦冲断的规模；而盆地内部深部变形的响应程度，则更多取决于滑脱层的传递效率与刚性基底的阻挡作用。二者并非简单线性对应，滑脱层的垂向解耦使得深浅变形可以呈现相反的梯度趋势。研究区南部相对较厚的膏盐层可有效传递来自龙门山造山带的挤压应力，促进深部构造在前陆拗陷带内扩展；而北部刚性基底的阻挡效应较强，加之相对较强的龙门山冲断作用，导致前锋发育规模较大的叠瓦扇状逆冲构造，同时深部变形因滑脱层减薄和基底阻挡而迅速衰减。综上，研究区深部变形自南向北减弱、浅部变形自南向北增强的梯度差异，是龙门山造山带挤压强度北强南弱、刚性基底阻挡效应北强南弱以及膏盐层滑脱能力南强北弱三者空间耦合的结果。

## 5 结论

(1) 川西坳陷中段隐伏滑脱背斜的多期构造变形呈现“印支早期深部先行、印支中期浅层主体、印支晚期整体萎缩”的脉冲式分配格局。背斜 A 在须二段沉积期缩短量达 142 m, 须五段沉积期骤减至 31 m; 背斜 B 深部在中下三叠统膏盐层沉积期缩短量达 217 m, 浅部两期累计缩短仅 44 m, 定量揭示了盆山挤压变形由深至浅、由早至晚分阶段传递的幕式规律。

(2) 受深部寒武系膏盐层与浅部嘉陵江组膏盐层的影响, 川西坳陷中段发育浅层山前冲断前锋推覆系统和深层盆内隐伏滑脱变形系统叠加的分层解耦样式。背斜 A 和背斜 B 的深浅缩短量差异揭示深浅变形系统不仅在时间上存在“错峰”响应, 也在空间上存在“叠置”关系, 共同构成了研究区域“深部先存褶皱-浅部逆冲推覆”的独特耦样式。

(3) 川西坳陷中段的构造变形沿走向呈现深部自南向北减弱、浅部自南向北增强的分段格局: 南段则以深部隐伏滑脱为主、浅部逆冲相对较弱; 中段表现为深浅层协调变形、应变分配均衡; 北段以浅部叠瓦逆冲楔规模增大、楔体向盆地强烈楔入为标志。这一分段特征是龙门山造山带挤压强度北强南弱、刚性基底阻挡效应北强南弱以及中下三叠统膏盐岩滑脱能力南强北弱三者空间耦合的结果。

## 参考文献

### References

- CHEN Z X, JIA D, ZHANG Q, et al., 2005. Balanced cross-section analysis of the Longmenshan foreland fold-thrust belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 38-45. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z X, JIA D, WEI G Q, et al., 2006. A concealed rift basin beneath the thin-skinned thrust structures in the southern segment of the western Sichuan foreland basin and its petroleum geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(4): 460-466. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z X, JIA D, WEI G Q, et al., 2008. Mesozoic-Cenozoic sedimentary migration and tectonic transformation in the western Sichuan foreland basin[J]. *Geology in China*, (3): 472-481. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y L, GU Y, CHEN G M, et al., 2008. Study on paleotectonic stress in the Qiongxian structure, western Sichuan depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 13(3): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W, YANG K M, LI S B, et al., 2009. Structural geometric modeling and analysis of Late Indosinian blind growth folds in the southern Longmen Mountains piedmont[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(3): 382-386. (in Chinese with English abstract)
- CHEN H D, LIU L, LIN L B, et al., 2021. Sedimentary response of the Upper Triassic Xujiahe Formation during the Longmenshan uplift in the western Sichuan depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 801-815. (in Chinese with English abstract)
- DENG K L, YU F L, 2005. Composite structures and their relationship with hydrocarbons in the western Sichuan depression[J]. *Oil & Gas Geology*, (2): 214-219. (in Chinese with English abstract)
- DAI Z C, ZHENG R C, ZHU R K, et al., 2010. Sequence filling patterns and oil-gas distribution rules of the Xujiahe Formation in the Sichuan paraforeland basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1817-1828. (in Chinese with English abstract)
- EPARD J L, GROSHONG R H, 1993. Excess area and depth to detachment[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 77(8): 1291-1302.
- FAN X L, ZHU T, PAN W L, et al., 2002. Structural deformation and petroleum exploration of the Late Triassic foreland basin in the central western Sichuan depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, (1): 25-30. (in Chinese with English abstract)
- FENG S Y, ZHANG P Z, LIU B J, et al., 2015. Deep crustal deformation of the Longmen Shan, eastern margin of the Tibetan Plateau, from seismic reflection and Finite Element modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121: 767-787.
- GROSHONG R H, EPARD J L, 1994. The role of strain in area-constant detachment folding[J]. *Journal of Structural Geology*, 16(5): 613-618.
- GUO Z W, DENG K L, HAN Y H, et al., 1996. Formation and evolution of the Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- GUO W X, LI S B, LIU S G, et al., 2012. Structural deformation characteristics and evolution of basin-mountain transition zone in central western

- Sichuan depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 19(6): 686-691. (in Chinese with English abstract)
- JIA D, ZHU X Z, JIA C Z, et al., 2003. Structural analysis of the Longmenshan foreland fold-thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(3): 402-410. (in Chinese with English abstract)
- JIN Z J, LONG S X, ZHOU Y, et al., 2006. Distribution characteristics of gypsum-salt rocks in southern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(5): 571-583. (in Chinese with English abstract)
- JIA D, LI Y Q, WANG M M, et al., 2011. Three-dimensional structural geometry of fault-related folds: A case study from the 3D seismic survey area in western Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 732-740. (in Chinese with English abstract)
- HE D F, LI Y Q, HUANG H Y, et al., 2020. Formation, evolution and hydrocarbon accumulation of the multi-cycle superimposed Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- HE J L, YANG Y T, ZHUO J C, 2022. Application of A/ $\lambda$  method in fold evolution analysis: A case study of western Sichuan depression[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 36(5): 7-11, 20. (in Chinese with English abstract)
- LIU H F, LIANG H S, CAI L G, et al., 1994. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 101-118. (in Chinese with English abstract)
- LIU S G, ZHAO X K, LUO Z L, et al., 2001. Study on tectonic events in the Longmenshan orogeny-western Sichuan foreland basin system[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, (3): 221-230. (in Chinese with English abstract)
- LIU S G, LUO Z L, ZHAO X K, et al., 2003. Coupling relationships and dynamic models of basin-mountain systems in western China: A case study of the Longmenshan orogeny-western Sichuan foreland basin system[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 177-186. (in Chinese with English abstract)
- LI Z W, LIU S G, LIN J, et al., 2009. Structural framework and genetic mechanism of the western Sichuan depression[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 645-653. (in Chinese with English abstract)
- LIU S G, YANG R J, WU X C, et al., 2009. Transition process from marine carbonate to clastic rocks during the Late Triassic in the western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 556-565. (in Chinese with English abstract)
- LIU S G, LI Z W, CAO J X, et al., 2009. Four-dimensional structural characteristics of the Longmenshan intracontinental composite orogenic belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1151-1180. (in Chinese with English abstract)
- LI L T, CHEN D X, ZHANG J H, et al., 2010. Restoration of eroded thickness of key unconformities in the central western Sichuan depression and its geological significance[J]. *Science & Technology Review*, 28(2): 71-75. (in Chinese with English abstract)
- LI Z W, LIU S G, CHEN H D, et al., 2011. Composite and combined structures and their control over hydrocarbons in the western Sichuan depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 38(5): 538-551. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, SU D C, DONG S L, et al., 2011. The basal unconformity of the Longmenshan foreland basin: A transition from passive continental margin to foreland basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2413-2422. (in Chinese with English abstract)
- LU R Q, 2011. Structural geometry and kinematics of the central Longmenshan Mountains and their constraints on the uplift mechanism of the southeastern Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- LU R Q, HE D F, JOHN S, et al., 2014. Structural model of the central Longmenshan thrust using seismic reflection profiles: Implications for the sediments and deformations since the Mesozoic[J]. *Tectonophysics*, 630: 43-53.
- LUO X Q, GUO W X, LYU Z Z, 2016. Discussion on the relationship between structural deformation and oil and gas in the Longmenshan area[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36(4): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 2020. Structural characteristics and evolution of the north-central western Sichuan depression[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- LI Z W, SONG T H, WANG Z J, et al., 2021. Deformation, uplift and sedimentary records of the strike differential evolution of the western Sichuan-Longmenshan basin-mountain system and discussion on key tectonic transformation periods[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(3): 257-282. (in Chinese with English abstract)
- LI S J, LI Z, ZHANG L, et al., 2023. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration direction of the Triassic subsalt ultra-deep layers in the western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1555-1567. (in Chinese with English abstract)
- LI L F, REN Q Q, YANG T, et al., 2024. Development characteristics of structural fractures in tight sandstone reservoirs under multi-level architectural interfaces: A case study of the second member of Xujiahe Formation in the western Sichuan depression[J]. *Petroleum Geology &*

- Experiment, 46(4): 722-734. (in Chinese with English abstract)
- MENG X W, LIU Y, SHI G S, et al., 2021. Control of tectonic evolution on hydrocarbon accumulation in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the central western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6): 986-995. (in Chinese with English abstract)
- NING M, LIU S, GONG W P, et al., 2015. Segmentation mechanism of the Longmenshan thrust belt[J]. *Geological Review*, 61(6): 1248-1256. (in Chinese with English abstract)
- QIN S F, ZHAO M J, SONG Y, et al., 2005. Natural gas accumulation process in the western Sichuan foreland basin[J]. *Earth Science Frontiers*, (4): 517-524. (in Chinese with English abstract)
- RAN Q, LEI C, CHEN K, et al., 2023. Structural deformation characteristics, evolution and petroleum geological significance of the northwestern Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 58(1): 18-35. (in Chinese with English abstract)
- SHI Z Q, LI Y, LUO X Q, et al., 2008. Indosinian normal faults in the Longmenshan area and their control on sedimentary facies and reservoirs[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35(6): 669-673. (in Chinese with English abstract)
- SHEN T, MENG L F, CHEN W, et al., 2021. Late Indosinian tectonic activity in the north-central Longmenshan Mountains: Evidence from structural analysis and detrital zircon geochronology[J]. *Earth Science*, 46(5): 1728-1736. (in Chinese with English abstract)
- WEI G Q, 2019. *Tectonic characteristics and petroleum of the Sichuan Basin*[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- WANG Z N, LU R Q, XU X W, et al., 2019. Three-dimensional structural characteristics of the buried active Pengxian fault in the piedmont of the central Longmenshan Mountains[J]. *Seismology and Geology*, 41(4): 944-959. (in Chinese with English abstract)
- WANG R F, KONG X L, DONG X, et al., 2026. Deep structural characteristics of the central Longmenshan Mountains and their implications for oil and gas exploration[J]. *Geological Science*, 61(1): 167-175. (in Chinese with English abstract)
- XIONG L, LI B, HE L, et al., 2017. Discussion on gas reservoir producing layers of Xujiahe Formation in the western Sichuan depression[J]. *Natural Science*, 5(2): 172-184. (in Chinese with English abstract)
- XU C H, CHEN W, 2023. Deformation structural characteristics and evolution of the Permian in the southwestern Sichuan area[J]. *Geological Review*, 69(S1): 56-58. (in Chinese with English abstract)
- YANG C Q, LIU S G, CAO B, et al., 2008. Coupling relationship between the Longmenshan orogenic belt and the western Sichuan foreland basin and its control on hydrocarbon accumulation[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, (4): 471-476. (in Chinese with English abstract)
- YU F S, ZHANG F F, YANG C Q, et al., 2010. Physical simulation of typical structural sections of the Guankou fault in the Longmenshan front and main controlling factors of deformation[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 147-158. (in Chinese with English abstract)
- YU F S, WANG Y H, LI X J, et al., 2011. Deformation characteristics and genetic mechanism simulation of the Xiaquan-Fenggu structural belt in the western Sichuan depression[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1): 45-53. (in Chinese with English abstract)
- YANG X, BAI M S, GONG H B, et al., 2025. Characteristics and quantitative prediction of structural fractures in the second member of Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, western Sichuan[J]. *Lithologic Reservoirs*, 37(3): 73-83. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG K, XU M J, WANG L S, et al., 2004. Geophysical characteristics of tectonic evolution in the northern and southern segments of the two-phase foreland basin in western Sichuan[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 25(6): 29-32. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG R C, ZHU R K, ZHAI W L, et al., 2008. Tectonic evolution and sequence filling patterns of the Late Triassic Xujiahe period in the western Sichuan para-foreland basin[J]. *Geology in China*, 35(2): 246-255. (in Chinese with English abstract)
- ZOU F G, YIN H W, 2009. Analysis of inversion structure styles and discussion on their genetic mechanisms in the Longmenshan area, Sichuan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 321-333. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, DONG S W, LI J H, et al., 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation and reworking of the Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 38(2): 233-250. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X J, CHEN W, LI S Q, 2015. Tectonic evolution and fault system analysis of the western Sichuan depression[C]. *Proceedings of the 2015 China Earth Science Joint Academic Annual Conference (XI)*: 39-40. (in Chinese)
- ZHANG S H, TIAN J, YE S J, et al., 2019. Accumulation process of gas reservoirs in the second member of Xujiahe Formation in the Xinchang structural belt, western Sichuan depression[J]. *Natural Gas Industry*, 39(S1): 17-22. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG N, HE D F, WANG R F, et al., 2024. Layered differential deformation characteristics and genesis of the middle segment of the Longmenshan

piedmont belt[J]. Chinese Journal of Geology, 59(3): 768-780. (in Chinese with English abstract)

ZHENG N, HE D F, GUO T L, et al., 2024. Spatiotemporal distribution characteristics of the Indosinian unconformities in the Mianzhu area, central Longmenshan front[J]. Acta Geologica Sinica, 98(3): 1-15. (in Chinese with English abstract)

ZHAO S, ZHAO D, ZHANG L, et al., 2025. Characteristics and genesis of dissolution in deeply buried tight sandstone reservoirs of the second member of Xujiahe Formation in the western Sichuan depression[J]. Mineralogy and Petrology: 1-24. (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

陈竹新, 贾东, 张愫, 等, 2005. 龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析[J]. 地质学报, 79(1): 38-45.

陈竹新, 贾东, 魏国齐, 等, 2006. 川西前陆盆地南段薄皮冲断构造之下潜伏裂谷盆地及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 27(4): 460-466.

陈竹新, 贾东, 魏国齐, 等, 2008. 川西前陆盆地中-新生代沉积迁移与构造转换[J]. 中国地质, (3): 472-481.

陈颖莉, 顾阳, 陈古明, 等, 2008. 川西拗陷西构造古构造应力研究[J]. 中国石油勘探, 13(03): 10-17.

陈伟, 杨克明, 李书兵, 等, 2009. 龙门山南段山前印支晚期隐伏生长褶皱的构造几何模拟与分析[J]. 科学通报, 54(3): 382-386.

陈洪德, 刘磊, 林良彪, 等, 2021. 川西拗陷西部龙门山隆升时期上三叠统须家河组沉积响应[J]. 石油与天然气地质, 42(04): 801-815.

邓康龄, 余福林, 2005. 川西拗陷的复合构造与油气关系[J]. 石油与天然气地质, (2): 214-219.

戴朝成, 郑荣才, 朱如凯, 等, 2010. 四川类前陆盆地须家河组层序充填样式与油气分布规律[J]. 地质学报, 84(12): 1817-1828.

范小林, 朱彤, 潘文蕾, 等, 2002. 川西拗陷中段晚三叠世前陆盆地构造变形与油气勘探[J]. 石油实验地质, (1): 25-30.

郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等, 1996. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社.

郭卫星, 李书兵, 刘树根, 等, 2012. 川西拗陷中段盆地过渡带构造变形特征及其演化[J]. 断块油气田, 19(6): 686-691.

贾东, 陈竹新, 贾承造, 等, 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 9(3): 402-410.

金之钧, 龙胜祥, 周雁, 等, 2006. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. 石油与天然气地质, 27(5): 571-583.

贾东, 李一泉, 王毛毛, 等, 2011. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析: 以川西三维地震工区为例[J]. 岩石学报, 27(3): 732-740.

何登发, 李英强, 黄涵宇, 等, 2020. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社.

何建磊, 杨映涛, 卓俊驰, 2022. A/ $\lambda$  法在褶皱演化分析中的应用——以川西拗陷为例[J]. 石油地质与工程, 36(5): 7-11, 20.

刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等, 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, (2): 101-118.

刘树根, 赵锡奎, 罗志立, 等, 2001. 龙门山造山带-川西前陆盆地系统构造事件研究[J]. 成都理工学院学报, (3): 221-230.

刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等, 2003. 中国西部盆地系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带-川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报, (2): 177-186.

李智武, 刘树根, 林杰, 等, 2009. 川西拗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), 36(6): 645-653.

刘树根, 杨荣军, 吴熙纯, 等, 2009. 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, 30(05): 556-565.

刘树根, 李智武, 曹俊兴, 等, 2009. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J]. 地质科学, 44(4): 1151-1180.

李林涛, 陈冬霞, 张建华, 等, 2010. 川西拗陷中段关键不整合面剥蚀厚度恢复及其地质意义[J]. 科技导报, 28(2): 71-75.

李智武, 刘树根, 陈洪德, 等, 2011. 川西拗陷复合-联合构造及其对油气的控制[J]. 石油勘探与开发, 38(5): 538-551.

李勇, 苏德辰, 董顺利, 等, 2011. 龙门山前陆盆地底部不整合面: 被动大陆边缘到前陆盆地的转换[J]. 岩石学报, 27(08): 2413-2422.

鲁人齐, 2011. 龙门山中段构造几何学、运动学及其对青藏高原东南缘升降机制的约束[D]. 中国地质大学(北京).

罗啸泉, 郭卫星, 吕志洲, 2016. 龙门山构造变形与油气关系探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 36(04): 71-76.

李文泳, 2020. 川西拗陷中北段构造特征及形成演化[D]. 中国石油大学(北京).

李智武, 宋天慧, 王自剑, 等, 2021. 川西-龙门山盆地系统走向差异演化的变形、隆升和沉积记录及关键构造变革期讨论[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(3): 257-282.

李双建, 李智, 张磊, 等, 2023. 四川盆地川西拗陷三叠系盐下超深层油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 44(6): 1555-1567.

李莉妃, 任启强, 杨田, 等, 2024. 多级构型界面下致密砂岩储层构造裂缝发育特征——以川西拗陷须家河组二段为例[J]. 石油实验地质, 46(4): 722-734.

孟宪武, 刘勇, 石国山, 等, 2021. 四川盆地川西拗陷中段构造演化对中三叠统雷口坡组油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 43(6): 986-995.

甯濛, 刘殊, 龚文平, 等, 2015. 龙门山冲断带分段机理研究[J]. 地质论评, 61(6): 1248-1256.

- 秦胜飞, 赵孟军, 宋岩, 等, 2005. 川西前陆盆地天然气成藏过程[J]. 地学前缘, (4): 517-524.
- 冉崎, 雷程, 陈康, 等, 2023. 四川盆地西北地区构造变形特征、演化及油气地质意义[J]. 地质科学, 58(1): 18-35.
- 时志强, 李云, 罗啸泉, 等, 2008. 龙门山地区印支期正断层及其对沉积相和储层的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(06): 669-673.
- 沈桐, 孟立丰, 陈伟, 等, 2021. 龙门山中北段印支晚期构造活动: 来自构造解析及碎屑锆石年代学的证据[J]. 地球科学, 46(5): 1728-1736.
- 魏国齐, 2019. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京: 科学出版社.
- 王振南, 鲁人齐, 徐锡伟, 等, 2019. 龙门山中段山前彭县隐伏活动断裂三维构造特征[J]. 地震地质, 41(4): 944-959.
- 汪仁富, 孔选林, 董霞, 等, 2026. 龙门山中段深层构造特征及其油气勘探意义[J]. 地质科学, 61(01): 167-175.
- 熊亮, 李斌, 何鲤, 等, 2017. 川西坳陷须家河组气藏产层域探讨[J]. 自然科学, 5(2): 172-184.
- 许晨昊, 陈伟, 2023. 川西南部地区二叠系变形构造特征及演化研究[J]. 地质论评, 69(S1): 56-58.
- 杨长清, 刘树根, 曹波, 等, 2008. 龙门山造山带与川西前陆盆地耦合关系及其对油气成藏的控制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), (4): 471-476.
- 于福生, 张芳峰, 杨长清, 等, 2010. 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, 34(2): 147-158.
- 于福生, 王彦华, 李晓剑, 等, 2011. 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, 33(1): 45-53.
- 杨旭, 白鸣生, 龚汉渤, 等, 2025. 川西新场地区三叠系须二段构造裂缝特征及定量预测[J]. 岩性油气藏, 37(3): 73-83.
- 郑荣才, 朱如凯, 翟文亮, 等, 2008. 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, 35(02): 246-255.
- 钟锴, 徐鸣洁, 王良书, 等, 2004. 川西两期前陆盆地南北两段构造演化的地球物理特征[J]. 石油学报, 25(06): 29-32.
- 邹付戈, 尹宏伟, 2009. 四川龙门山地区反转构造样式分析及其成因机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 33(03): 321-333.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等, 2011. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. 中国地质, 38(02): 233-250.
- 周小军, 陈伟, 李世琴, 2015. 川西坳陷的构造演化和断裂体系分析[C]. 2015中国地球科学联合学术年会论文集(十一): 39-40.
- 张世华, 田军, 叶素娟, 等, 2019. 川西坳陷新场构造带须二段气藏成藏过程[J]. 天然气工业, 39(S1): 17-22.
- 郑娜, 何登发, 汪仁富, 等, 2024. 龙门山山前带中段分层差异变形特征及成因[J]. 地质科学, 59(3): 768-780.
- 郑娜, 何登发, 郭彤楼, 等, 2024. 龙门山前中段绵竹地区印支期不整合面时空分布特征[J]. 地质学报, 98(3): 1-15.
- 赵爽, 赵迪, 张玲, 等, 2025. 川西坳陷须家河组二段深埋致密砂岩储层溶蚀作用特征与成因[J]. 矿物岩石: 1-24.