引用格式：马佳，何登发，鲁国，等，2025. 软弱层对逆冲构造变形的影响：有限元数值模拟研究[J]. 地质力学学报，31（3）：444−457. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024126

Citation: MA J，HE D F，LU G，et al.，2025. The influence of weak layers on thrust structure deformation: A finite element numerical simulation study[J]. Journal of Geomechanics，31（3）：444−457. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024126

软弱层对逆冲构造变形的影响：有限元数值模拟研究

马　佳[1]，何登发[1]，鲁　国[1]，张伟康[1]，黄涵宇[2]，刘驰悦[1]

MA Jia[1]，HE Dengfa[1]，LU Guo[1]，ZHANG Weikang[1]，HUANG Hanyu[2]，LIU Chiyue[1]

1. 中国地质大学（北京）能源学院，北京 100083；
2. 成都理工大学沉积地质研究院，四川成都 610059

1. *School of Energy Resources*, *China University of Geosciences* (Beijing), *Beijing* 100083, *China*;
2. *Institute of Sedimentary Geology*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*

The influence of weak layers on thrust structure deformation: A finite element numerical simulation study

Abstract: ［**Objective**］As ubiquitous critical structural units in sedimentary basins, weak layers are characterized by low shear strength, low Young's modulus, and pronounced plastic rheological behavior, playing a key role in stress accommodation and strain partitioning during tectonic deformation. Seismic reflection profiles from areas such as Liangcun, Jiaoshiba, and Changning in southeastern Sichuan reveal widespread regional weak layers within sequences overlying deep thrust fault systems.［**Methods**］To investigate the dynamic control mechanism of weak layers on thrust deformation, a typical bend fault was selected as the pre-existing fault structure, and comparative experiments with/without weak layers were designed. Finite element modeling was employed to conduct numerical simulations under lateral compression. A comparative analysis of the simulation results from the two model sets systematically examines how weak layers control structural deformation during tectonic movement, particularly the influence of weak layer thickness on upper and lower structural deformation.［**Results**］(1) The weak layer-free model demonstrates that, under lateral compression, the overlying strata undergo thrust-parallel slip and fold deformation along the pre-existing bend fault. The deformation exhibits remarkable coherence among strata, with no observable interlayer slip or stratified differential deformation. Meanwhile, the maximum principal stress field displays characteristic tectonic stress zoning, while plastic strain concentrates on both the forelimb and the backlimb with upward-decreasing intensity. (2) The weak layer-bearing model reveals that, under combined lateral compression and underlying structural uplift, the weak layer experiences plastic flow, manifesting as top-thinning and limb-thickening. This results in stratified deformation patterns bounded by the weak layer. Furthermore, the distribution of maximum principal stress and plastic strain shows distinct stressen–strain decoupling across the weak layer interface.［**Conclusion**］(1) The weak layer constitutes a critical factor in initiating structural stratification. Under lateral compression conditions, the weak layer undergoes plastic flow accompanied by localized thickening and thinning. It significantly accommodates underlying structural deformation and stress-strain, thereby generating differential deformation across the weak layer interface and producing distinct stress-strain decoupling between the upper and lower structural domains. (2) The thickness of weak layers constitutes a critical parameter controlling deformation styles. Thicker weak layers result in longer wavelengths and gentler limb dips with reduced uplift amplitudes for overlying folds; they also produce shorter wavelengths, steeper limb dips and greater uplift amplitudes for underlying folds, thereby enhancing deformation partitioning. Conversely, thinner weak layers lead to more coherent deformation

基金项目：国家自然科学基金重点项目（42330810）

This research is financially supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42330810).

第一作者：马佳（2000—），女，在读硕士，主要从事构造地质学研究。Email：majia5057@163.com

通信作者：何登发（1967—），男，博士，教授，主要从事构造地质学与石油地质学研究。Email：hedengfa282@263.net

收稿日期：2024−11−19；**修回日期**：2025−04−22；**录用日期**：2025−04−27；**网络出版日期**：2025−05−19；**责任编辑**：范二平

between the upper and lower structural domains. [**Significance**] The research findings regarding the influence of weak layers on thrust structural deformation revealed in this study can provide valuable references for structural deformation analysis and dynamic modeling in regions with similar stratigraphic characteristics, such as the Liangcun area, the Jiaoshiba block, and the Changning region in southeastern Sichuan.

Keywords: weak layers; southeastern Sichuan region; thrust fault; tectonic deformation; finite element numerical simulation

摘　要：软弱层作为沉积盆地中普遍存在的关键构造单元，以低剪切强度、低杨氏模量及显著的塑性流变行为为特征，在构造变形中扮演应力调节与应变分异的角色。四川盆地东南（川东南）地区良村、焦石坝及长宁等地的地震反射剖面显示，在深部逆冲断裂系统上覆层序普遍发育区域性软弱层。为揭示软弱层对逆冲构造变形的动力学控制机制，选取典型的转折断层作为先存断裂构造，设计有/无软弱层的对照试验，采用有限元方法在侧向挤压的条件下进行数值模拟。通过对比分析 2 组模型的模拟结果，系统研究软弱层在构造运动过程中对构造变形的控制机制，并重点探讨软弱层厚度对上/下构造变形的影响。研究结果表明：软弱层是引发构造分层变形的重要因素，在侧向挤压条件下，软弱层发生塑性流动并伴随局部的增厚与减薄，其对下伏构造变形与应力应变具有显著的吸收作用，从而以软弱层为界产生上/下构造分层差异变形与应力应变解耦的现象；软弱层厚度是控制变形样式的关键参数，软弱层越厚，其上覆褶皱半波波长越长，两翼倾角越平缓，隆升幅度越小，下伏褶皱半波波长越短，两翼倾角越陡倾，隆升幅度越大，分层变形的特征越明显；软弱层越薄，其上/下构造变形越一致。研究成果可为与川东南地区良村、焦石坝以及长宁等具有相同地层特征的地区的构造变形解析与动力学分析提供较好的参考依据。

关键词：软弱层；川东南地区；逆冲构造；构造变形；有限元数值模拟

中图分类号：P553; P554　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)03−0444−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024126

0　引言

软弱岩层是指在地质体中具有相对较低的力学强度和变形模量的岩层，按成因可分为原生型与次生型 2 类。原生型软弱岩层是由其本身的岩性特征决定，如盐岩、膏岩、泥岩以及煤层等；次生型软弱岩层则是指坚硬岩石因风化作用或裂隙节理高度发育的岩层。文中所涉及的软弱层类型为原生型，其具有抗剪强度低、硬度小、刚性差等特点，因而在侧向挤压下易发生塑性变形而不易破裂，这种力学行为对区域构造变形格局具有重要调控作用（段云江等，2021, 2023, 2024；徐旺林等，2021；王莉等，2021；杨克基等，2022；吴珍云等，2023；杨秀磊，2023）。典型实例可见于四川盆地东南（川东南）地区隔挡式褶皱带，该地区发育多排背斜，且同一背斜不同段以及不同背斜之间构造样式具有明显的差异性。已有研究认为这种变形特征的空间分异现象主要受该地区垂向上发育的软弱层系统控制（何登发等，2011, 2019a；林良彪等，2014；谷志东等，2015；贾小乐，2016；张旭亮等，2023；赵圣贤等，2023）。

为系统揭示软弱岩层在逆冲构造演化中的控制机制，选取具有明确几何学−运动学特征的断层转折褶皱作为基础模型，通过建立含软弱层与无软弱层的对比模型，运用 ABAQUS 有限元数值模拟技术，系统分析侧向挤压条件下软弱岩层对逆冲构造变形的影响，重点揭示软弱岩层厚度对其上/下构造的控制作用。

1　软弱层对构造变形影响的研究现状

全球沉积盆地中发育软弱层的比例高达 48%（Hudec and Jackson, 2006），这一现象在经历多旋回构造演化的中国克拉通盆地中尤为显著。以四川盆地、鄂尔多斯盆地和塔里木盆地为例，其垂向沉积序列普遍发育多套软弱岩层系统（图 1）：四川盆地中—上寒武统膏盐岩层、志留系泥页岩层及上二叠统煤层组成的区域性滑脱层；鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组膏盐岩层与中—上泥盆统泥页岩层形成的古生代软弱层系叠覆二叠系煤层与侏罗系延长组泥岩层；塔里木盆地则发育中寒武统区域性膏盐岩软弱层（赵文智等，2003；何登发等，2013, 2019b；何登发，2022；江青春等，2022；包洪平等，

2023)。软弱层的普遍发育使得盆地的构造变形呈现出独特的分层变形特征。

近年来,逆冲构造与软弱层相互作用机制研究取得重要进展。在数值模拟方面,Khalifeh-Soltani et al.(2023)通过有限元方法系统揭示了逆断层相关褶皱端元模型的应力传递规律;Li et al.(2021)采用离

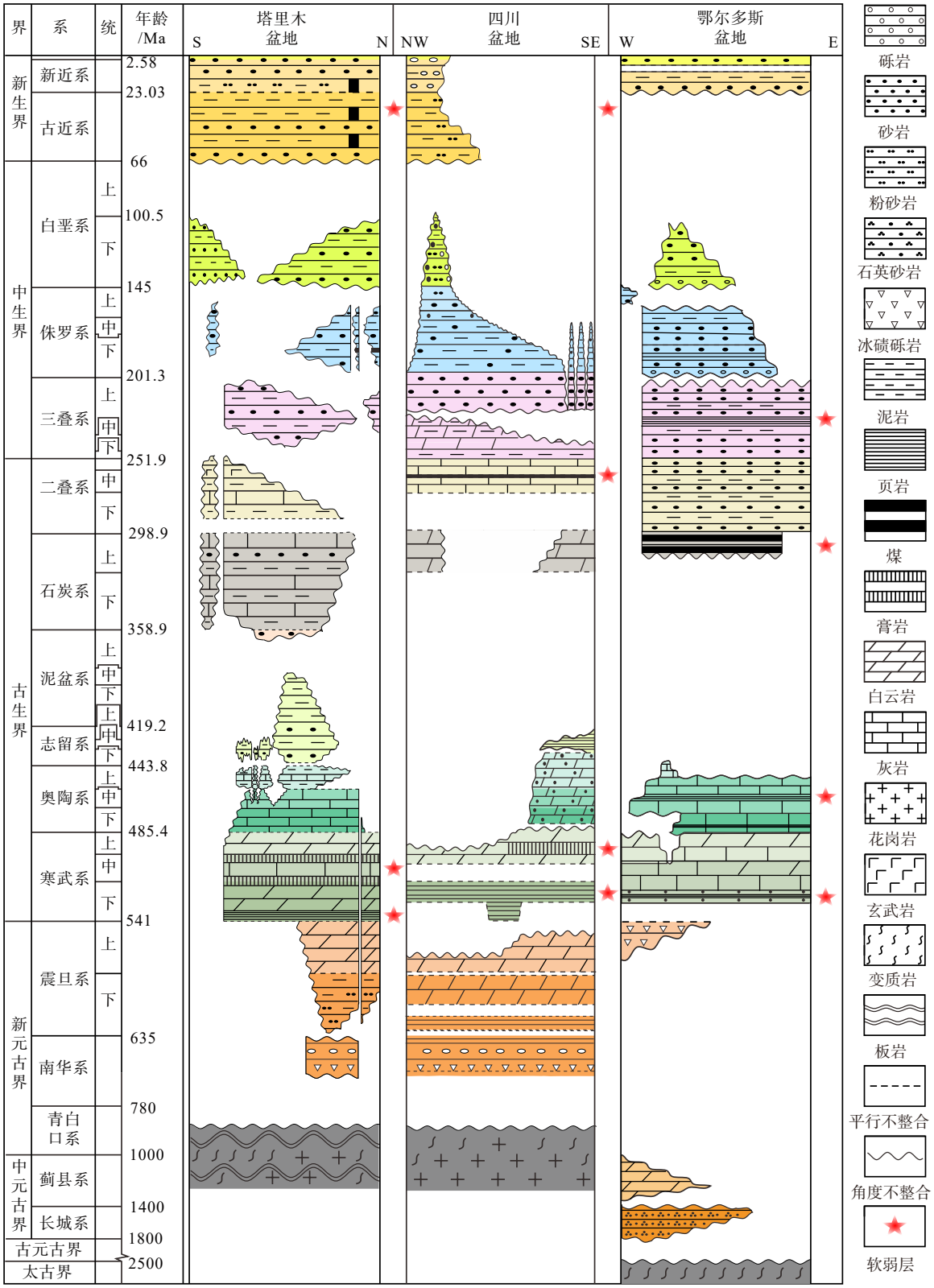


图 1 中国三大克拉通盆地的地层柱状图(据何登发,2022 修改)

Fig. 1 Stratigraphic columns of the three major cratons in China (modified from He, 2022)

散元模拟证实薄盐层会显著抑制盐构造流动性。在物理模拟领域，Plotek et al.(2021)通过砂箱实验建立了断层转折褶皱几何形态与位移模式的定量关系；赵利等(2019)则发现含软弱层逆冲系统具有显著的垂向变形解耦特征。然而，现有研究仍存在两方面的局限性：①在探究逆冲构造变形的动力学机制时缺少对上覆地层含有软弱层时的考虑；②在探究软弱层对逆冲构造变形的研究时所采用的研究手段难以直观体现构造变形过程中应力–应变的分布，且未充分考虑实际地层岩性参数。针对上述科学问题，此次研究创新性地构建了基于实际岩性参数的弹塑性有限元模型。该方法不仅能够精细刻画软弱层在逆冲构造演化中的塑性流变行为，还可实现构造变形过程中应力场–应变场的动态可视化，为揭示软弱层对逆冲系统的控制机制提供了新的技术路径。

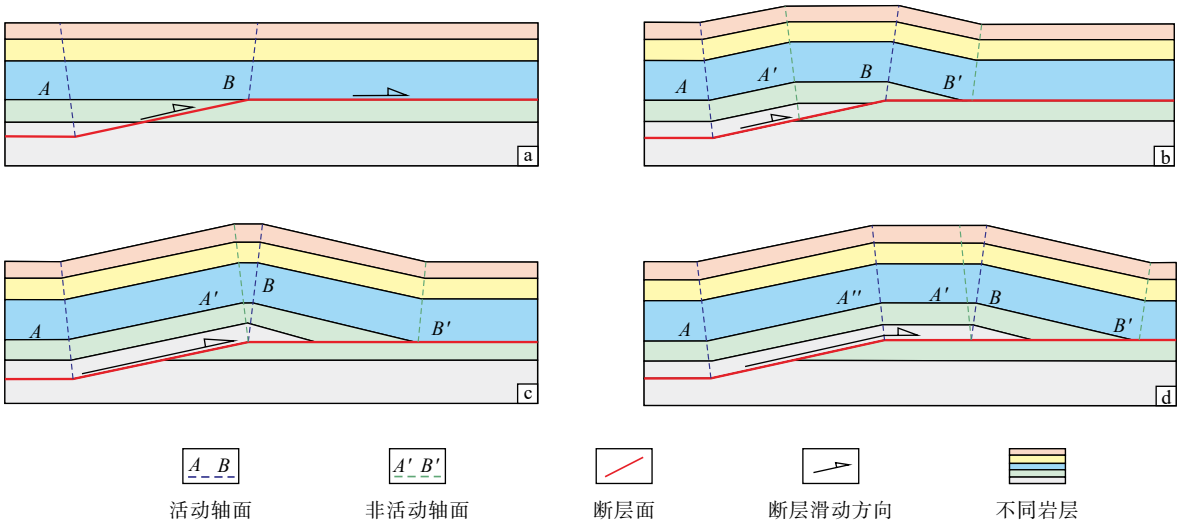
2　研究方法及模型设计

2.1　有限元计算方法

有限元计算方法基于质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律，通过构建描述物理过程的偏微分方程，结合几何方程、本构方程及平衡方程，形成完整的控制方程组。该方法将复杂连续体划分为有限数量的简单单元(如三角形、四边形以及三维体积单元)，并通过节点连接形成有限元网格，将单元节点的待求解量输入到有限元程序中，利用求解高阶代数方程组来计算，从而得到各节点所求量的近似值。在构造地质学研究中，该方法具有操作便捷、支持多尺度模拟、能处理复杂边界条件并考虑岩性、温度、流体等因素影响的优势，同时还能有效地将结构变形和应力分布进行定量化研究。目前，有限元计算方法已经广泛运用于造山带、俯冲带、盆地、褶皱以及断层等构造地质领域，研究成果丰富(胡才博等，2009；袁杰和朱守彪，2014；徐珂等，2015；尹力和罗纲，2018；周书红等，2023；Khalifeh-Soltani et al.，2023；庞一桢等，2025)，在解决构造地质学问题中表现出了较高的可靠性。

2.2　模型设计

以 Suppe(1983)提出的经典断层转折褶皱模型为原型，该模型由下断坪、断坡以及上断坪构成(图 2)，其运动学特征遵循 4 个基本约束：①断坪–断坡–断坪的断层形态形成于断层滑动之前或滑动开始之前；②上盘在固定的下盘之上运动；③下盘不变形；④上盘断坪上的断层位移是不变的，而在断坡部位位移是向上减小的。



a—未变形地层中的初始逆冲断层及轴面；b—断层滑动导致上盘岩块沿固定在 2 个断层弯曲处的活动轴面 A 和 B 发生褶皱；c—断层持续滑动导致褶皱处于抬升阶段；d—褶皱持续拓宽阶段

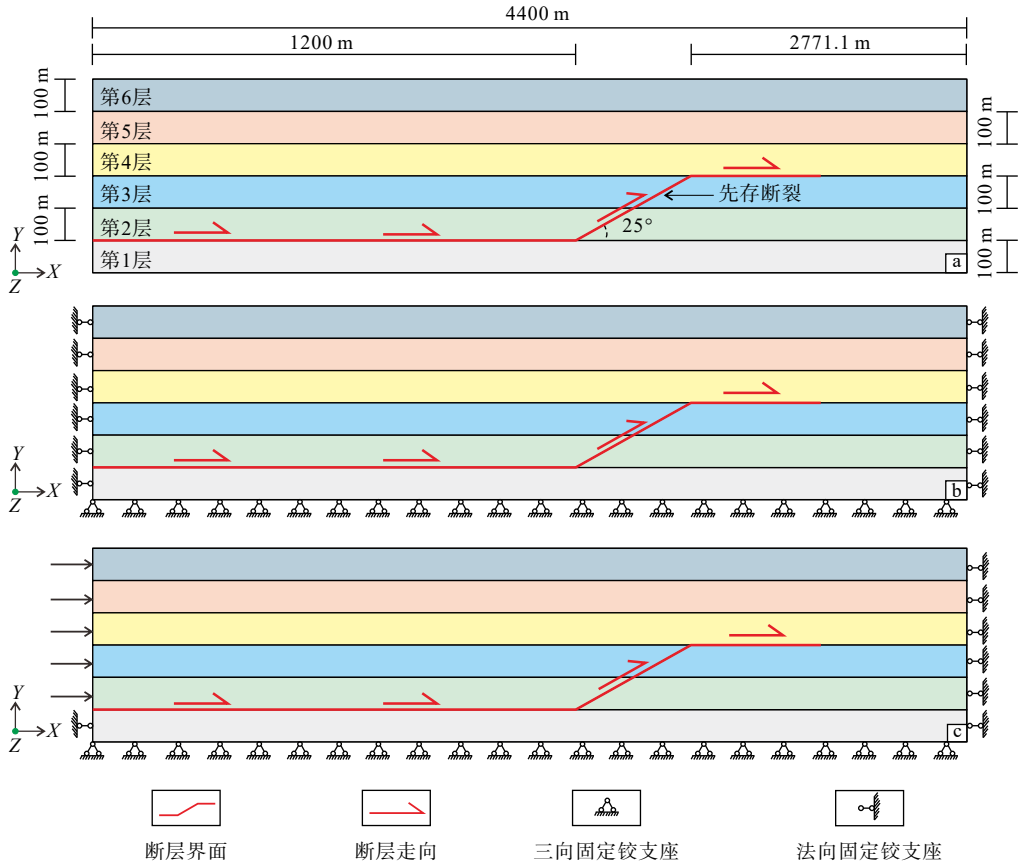
图 2　断层转折褶皱几何学与运动学模型（据 Suppe，1983 修改）

Fig. 2　Geometry and kinematic models of fault–bend folding (modified from Suppe, 1983)

(a) Incipient thrust fault and axial surfaces in undeformed strata; (b) Fault slip causes folding of the hanging wall block along active axial surfaces A and B that are pinned to the two fault bends; (c) Persistent fault slip leads to the fold entering the uplift stage; (d) Progressive fold broadening stage

2.2.1 地质模型建立

基于以往对断层转折褶皱研究的研究成果，采用转折断层作为模型中的先存断裂。模型共分为6层，其中第5层为研究的对照层，各层厚度均匀，层间采用面−面接触方式，接触摩擦系数设为0.15，断坡角取25°（图3a）。为聚焦研究问题，模型未考虑运动过程中断层生长与扩展以及地层生长与剥蚀等地质过程。根据断层转折褶皱理论，假设下伏转折断层已存在，在挤压环境下，随着构造运动的发生，通过在上覆岩层中设置有/无软弱层的对照试验，分析软弱层对构造变形的影响。



a—地质模型图；b—初始阶段边界条件图；c—运动阶段边界条件图

图3 地质模型与边界条件图

Fig. 3 Sketch of the geological model and boundary conditions at different stage

(a) Geological model; (b) Boundary conditions at initial stage; (c) Boundary conditions during movement

2.2.2 力学模型建立

在上述地质模型的基础上，设计了对照模型：①模型1，不含软弱层（即第5层非软弱层）；②模型2，第5层为软弱层。除第5层岩性差异外，2个模型的其他条件完全相同。力学模型的建立过程主要包括以下3个方面。

（1）岩石力学参数

由于模拟对象为上地壳浅层沉积岩变形行为，不涉及下地壳及地幔的变化。因此，模型采用能够较好体现岩石材料强度特性和变形破坏行为的Mohr-Coulomb弹塑性准则进行控制（童亨茂等，2024）。在此变形过程中，岩石首先经历弹性变形，当内部应力达到屈服应力时，塑性变形开始主导后续变形过程，这种塑性变形的本构关系可以用屈服函数f表示：

$$f = \tau_m + \sigma_m - C\cos\varphi \tag{1}$$

式中，τ_m—最大剪应力，MPa；σ_m—平均应力，MPa；φ—内摩擦角，(°)；C—黏聚力，MPa。

因此，模型所需要考虑的岩性参数有密度、杨氏模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力以及剪胀角这6个弹塑性参数。为更贴近川东南地区实际地质情

况，通过调研该地区岩石力学参数并结合多次重复试验（李本亮等，2001；钟城等，2018；谢佳彤等，2021；马佳等；2024；曹环宇等，2024），最终确定了2组模型的岩石力学参数（表1，表2）。其中，软弱层的岩石力学参数参考盐层与膏岩层等实际地质体中软弱层的参数（许宝田等，2008；张必龙等，2009；张志强等，2010；完颜祺琪等，2016）。根据已有研究，密度参数的变化对褶皱变形影响较小（Wei et al., 2014; Plotek et al., 2021；王莉等，2021），因此除软弱层中考虑密度变化外，其余层的密度参数保持一致。

表 1　模型 1 的岩石力学参数设置表

Table 1　Rock mechanical parameters for Model 1

	密度/(kg/m³)	杨氏模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪胀角/(°)
第1层	2500	55	0.25	23.47	45.00	12.81
第2层	2500	25	0.35	21.28	42.78	10.08
第3层	2500	36	0.33	15.47	39.85	9.25
第4层	2500	27	0.31	13.81	40.39	8.71
第5层	2500	37	0.35	11.72	38.46	7.68
第6层	2500	30	0.32	17.51	41.26	8.49

表 2　模型 2 的岩石力学参数设置表

Table 2　Rock mechanical parameters for Model 2

	密度/(kg/m³)	杨氏模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪胀角/(°)
第1层	2500	55	0.25	23.47	45.00	12.81
第2层	2500	25	0.35	21.28	42.78	10.08
第3层	2500	36	0.33	15.47	39.85	9.25
第4层	2500	27	0.31	13.81	40.39	8.71
第5层	2300	5	0.35	9.63	1.43	6.37
第6层	2500	30	0.32	17.51	41.26	8.49

（2）边界条件与分析步骤

为使力学模型既贴近真实地质情况，又能简明地展现所研究的地质过程，边界条件的设置和分析步的设定至关重要。文中建立的力学模型包括2个分析步骤（图3b、3c）：第1步为模型的初始状态，旨在保持模型的稳定性，底边界设置为三向固定，左右两侧为法向固定，上表面为自由边界；第2步为模型的加载运动阶段，底部边界与上表面边界条件与第1步相同，左侧第1层与右侧法相固定，而左侧的第2层到第6层施加300 m的位移边界条件以模拟挤压环境下的运动过程。

（3）网格划分

网格划分是有限元计算前至关重要的一步，网格的质量直接影响计算结果的精度。为平衡好计算精度与耗时之间的关系，更好地体现滑动面（断层界面）与上覆褶皱发育时的应力−应变特征，以及避免模型运动过程中出现网格嵌入等接触不良的情况，根据有限元的网格划分原理，采用局部自适应三角形网格划分方法，在兼顾计算效率与精度的原则下，针对断层界面及上盘褶皱区域进行网格加密，最终建立包含6825个单元、4072个节点的精细化模型。同时，为便于后续模拟结果数据成图，在网格模型中的第4—6层顶界面分别取14个监测点（图4）。

3　模拟结果分析

基于2组对照模型的有限元数值模拟结果，系统获取了最大主应力场、等效塑性应变分布及褶皱隆升量−波长关系等关键参数。其中，最大主应力控制了岩石的变形方式和断裂方向。岩石通常沿垂直于最大主应力的方向发生破裂，或沿与最大主

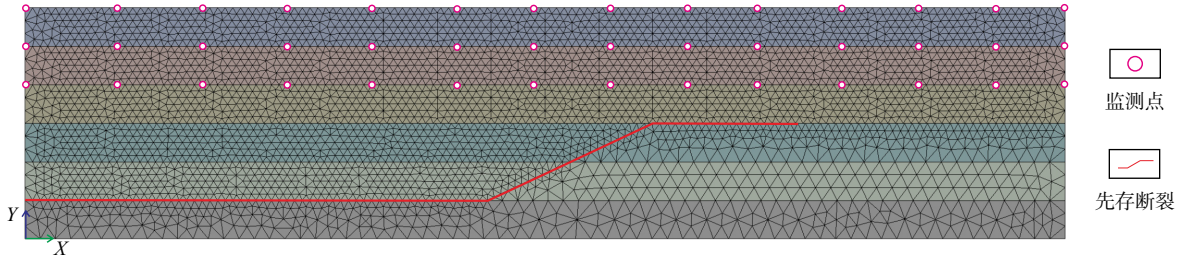


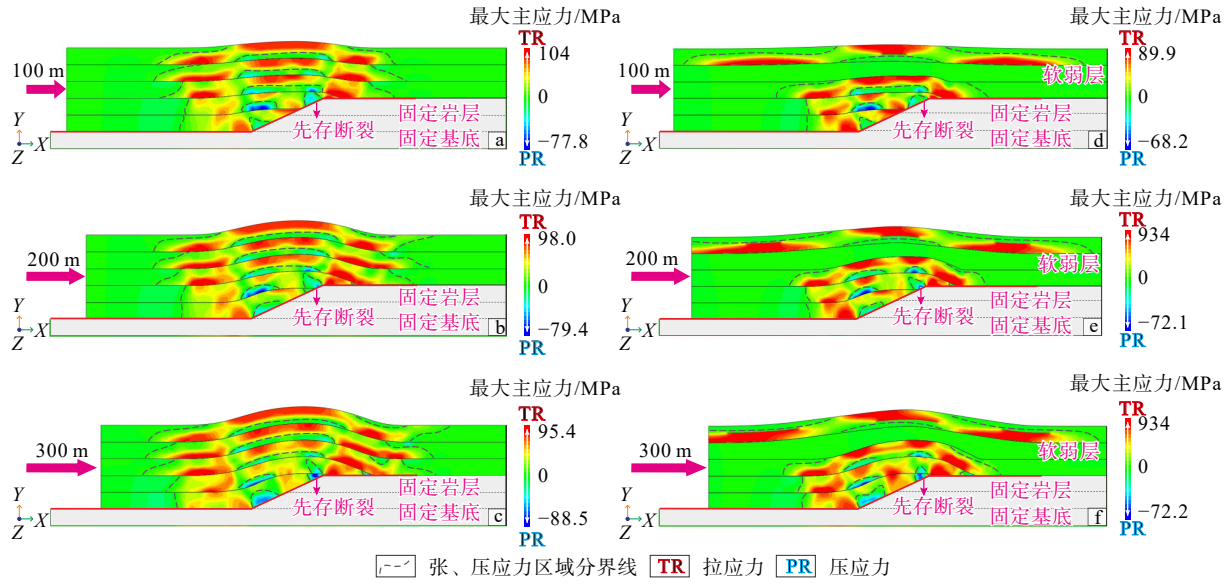
图 4 模型网格划分图

Fig. 4 Model mesh diagram

应力呈一定角度的方向发生剪切破裂。等效塑性应变(PEEQ)反映岩石在构造运动过程中经历的塑性变形程度,高等效塑性应变区域通常对应于构造薄弱带,如剪切带、断层带或褶皱核部,这些区域往往是应力集中和应变局部化的结果。因此,下面将对所导出的最大主应力分布以及等效塑性应变分布等模拟结果进行分析。

3.1 模型 1 结果分析

模型 1(无软弱层)的模拟结果(图 5a—5c,图 6a—6c)显示,随着左侧边界位移加载至 300 m,上覆地层在基底断层控制下发生褶皱变形。第 4 层与第 6 层间的褶皱形态测量数据(表 3)表明,各岩层变形具有高度一致性,未出现显著的层间滑移或分层差异变形现象。同时,最大主应力场呈现典型的构造应力分带特征:背斜顶部及向斜底部发育拉张应力区,而背斜底部与向斜顶部则形成挤压应力集中区,该空间分布模式与经典断层相关褶皱理论预测高度吻合(Erickson et al., 2005; 祖克威等, 2014; Khalifeh-Soltani et al., 2023; 杨晓平等, 2024)。模型模拟结果较为可靠。对于等效塑性应变的结果分析,随着左



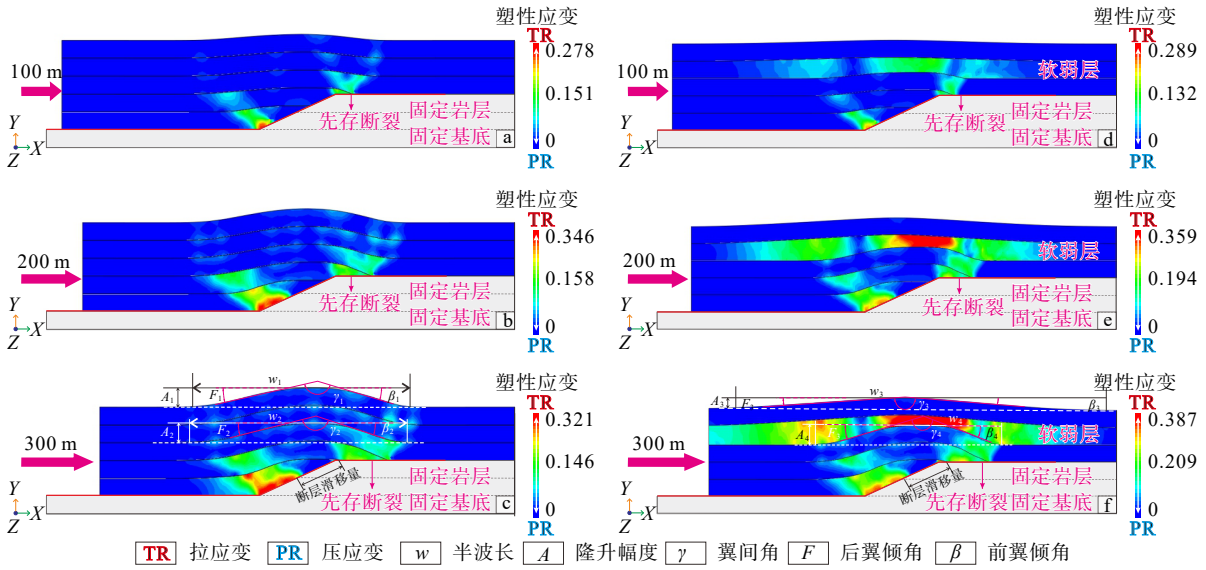
a—无软弱层模型推移 100 m 最大主应力分布图;b—无软弱层模型推移 200 m 最大主应力分布图;c—无软弱层模型推移 300 m 最大主应力分布图;d—有软弱层模型推移 100 m 最大主应力分布图;e—有软弱层模型推移 200 m 最大主应力分布图;f—有软弱层模型推移 300 m 最大主应力分布图

图 5 模型 1、模型 2 的几何演化与最大主应力分布图

Fig. 5 Geometric evolutions and maximum principal stress distributions for Model 1 and Model 2

(a) The maximum principal stress distribution of the model without weak layers after a 100 m displacement; (b) The maximum principal stress distribution of the model without weak layers after a 200 m displacement; (c) The maximum principal stress distribution of the model without weak layers after a 300 m displacement; (d)The maximum principal stress distribution of the model with weak layers after a 100 m displacement; (e) The maximum principal stress distribution of the model with weak layers after a 200 m displacement; (f) The maximum principal stress distribution of the model with weak layers after a 300 m displacement

侧推移量的增加，首先在褶皱两端的向斜底部区域（2 个转折端处）形成了 V 字形塑性区域。随着推移量的增加，塑性区域范围增大，主要在两翼分布且向上呈现递减的趋势，其中第 2 层后翼和第 3 层前翼（前翼是指褶皱向前倾斜的部分）、后翼部承担主要的塑性变形。



a—无软弱层模型推移 100 m 等效塑性应变分布图；b—无软弱层模型推移 200 m 等效塑性应变分布图；c—无软弱层模型推移 300 m 几何参数与等效塑性应变分布图；d—有软弱层模型推移 100 m 等效塑性应变分布图；e—有软弱层模型推移 200 m 等效塑性应变分布图；f—有软弱层模型推移 300 m 几何参数等效塑性应变分布图

图 6　模型 1、模型 2 的褶皱几何参数与等效塑性应变分布图

Fig. 6　Geometric parameters of folds and equivalent plastic strain distributions for Model 1 and Model 2

(a) Equivalent plastic strain distribution of the model without weak layers after a 100 m displacement; (b) Equivalent plastic strain distribution of the model without weak layers after a 200 m displacement; (c) Equivalent plastic strain distribution of the model without weak layers after a 300 m displacement; (d) Equivalent plastic strain distribution of the model with weak layers after a 100 m displacement; (e) Equivalent plastic strain distribution of the model with weak layers after a 200 m displacement; (f) Geometric parameters and equivalent plastic strain distribution of the model with weak layers after a 300 m displacement

表 3　模型 1、模型 2 的褶皱几何参数表

Table 3　Geometric parameters of folds for Model 1 and Model 2

模型	角标	w/m	A/m	γ/(°)	F/(°)	β/(°)
模型1	1	1289.92	114.71	150.43	12.88	16.69
	2	1291.10	117.74	147.66	14.21	18.13
模型2	3	2229.96	33.89	171.39	3.97	4.64
	4	1121.23	125.02	142.16	17.26	20.58

注：w—半波长；A—褶皱幅度；γ—翼间角；β—前翼倾角；F—后翼倾角

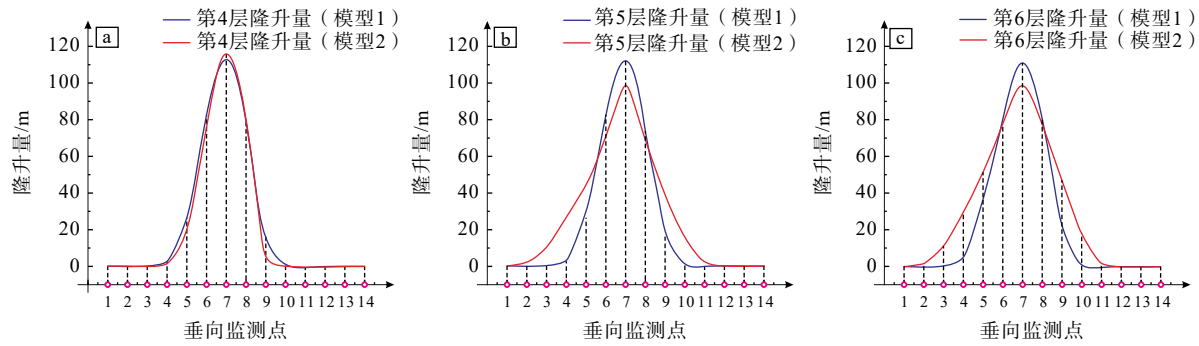
3.2　模型 2 结果分析

模型 2 是在模型 1 的基础上，将第 5 层的岩性参数替换为软弱层的岩性参数，以模拟含软弱层时的褶皱变形特征。其演化过程以及应力、应变分析如图 5d—5f 和图 6d—f 所示。演化过程所取推移量与模型 1 相同，但可以明显观察到，在左侧推移过程中，构造变形不仅受到下伏断层控制，还受到上覆软弱层的影响。随着模型整体推移到 300 m 时，第 5 层作为力学分界层导致显著的垂向变形解耦：其下伏地层表现为陡倾褶皱变形，而上覆地层则发育宽缓背斜构造（表 3）。这种分层变形现象源于软弱层独特的力学响应，在侧向挤压与下伏褶皱隆升的耦合作用下，软弱层发生塑性流动并在两翼形成物质增厚、顶部出现减薄。该变形模式与野外实测的含膏盐层褶皱系统具有良好的可比性，印证了软弱层作为构造滑脱层控制变形分带性的重要作用。

模型 2 的最大主应力分布和等效塑性应变分布均受上覆软弱层的影响，导致分布出现较大的差异（图 5d—5f，图 6d—6f）。其中，最大主应力分布除软弱层外（第 5 层），受压区和受拉区与模型 1 的分布位置基本一致。而等效塑性应变从软弱层开始出现显著的解耦现象，塑性应变集中在了软弱层及下伏岩层中。分析认为，在侧向挤压与下伏褶皱隆

升的共同作用下软弱层通过塑性流动耗散了部分构造应力，导致上覆地层应变能积累受限，这就解释了其宽缓变形特征的形成机制，从而形成以软弱层为界，上/下变形差异较大的构造变形。

基于上述结果分析，2 个模型的位移场曲线分布特征清晰地揭示了软弱层对垂向变形分带的控制效应（图 7a—7c）。第 4 层位移曲线显示，含软弱层时，软弱层下伏构造相较于正常地层构造变得更为陡倾。第 5、6 层曲线特征表明，软弱层的塑性流变性在构造运动过程中吸收了下伏构造的变形，使得原本的构造变形变得平缓，证实了软弱层对地层应变分配的调节作用。综上分析认为，软弱层会导致构造变形出现分层解耦的现象。在软弱层的塑性流变作用下，构造变形过程中会产生局部的增厚与减薄，从而导致以软弱层为界，上/下变形不一致。



a—2 组对照模型第 4 层顶部隆升量；b—2 组对照模型第 5 层顶部隆升量；c—2 组对照模型第 6 层顶部隆升量

图 7 模型 1 与模型 2 隆升量曲线图

Fig. 7 Uplift amout curves for Model 1 and Model 2

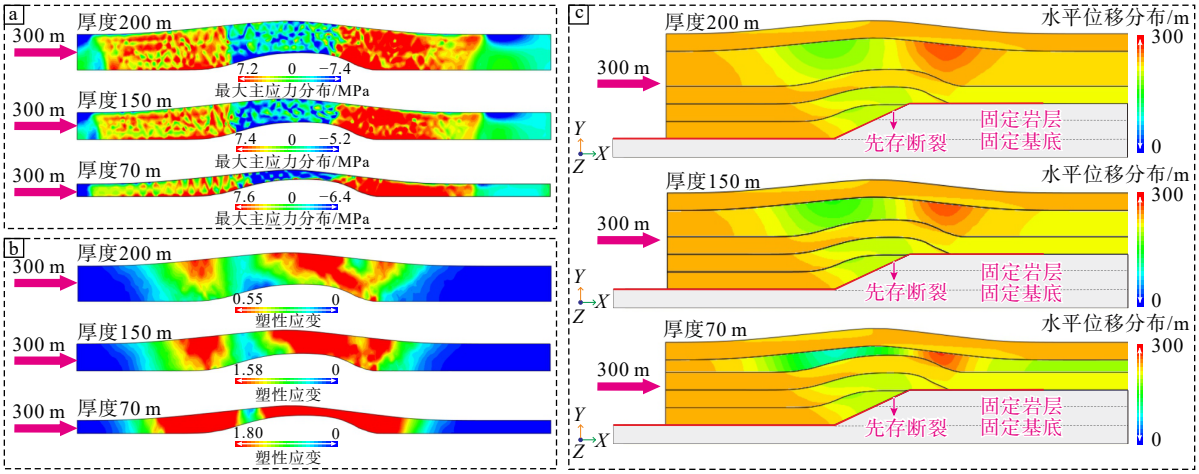
(a) Uplift amount at the top of Layer 4 in the two comparative models; (b) Uplift amount at the top of Layer 5 in the two comparative models; (c) Uplift amount at the top of Layer 6 in the two comparative models

4 讨论

上述研究假设软弱层厚度与上/下层厚度一致，但通过观察实际地质情况发现，因沉积环境不同，各地区所沉积的软弱层厚度也不相同，因此在构造变形过程中软弱层厚度并非均一。为进一步探讨软弱层整体构造变形的影响，将设计 3 组不同厚度软弱层模型，探讨软弱层厚度对逆冲构造变形的影响。其中，3 组模型的软弱层厚度分别为 70 m、150 m 以及 200 m。除软弱层厚度的差异外，这些模型在岩性、边界条件以及分析步等方面与上述模型 2 一致。

通过有限元数值模拟手段对上述 3 组不同软弱层厚度的模型进行模拟，模拟结果如下：3 组模型除软弱层外，其他各层的应力−应变状态分布与模型 2 模拟结果差异不大，因此单独将软弱层取出分析。首先，通过不同厚度软弱层的最大主应力分布可以看出（图 8a），软弱层越薄，所产生的最大主应力越大，在减薄的区域形成受压区，在增厚的区域形成张性区。另外从不同厚度软弱层的等效塑性应变分布也可以看出（图 8b），软弱层越薄，塑性应变越大，且分布越广。因此，根据模拟结果分析认为在同样的挤压条件下，薄的软弱层塑性流动性质会相对较弱，厚的软弱层的塑性流动较强，从而含有薄层软弱层的构造更容易产生应力−应变的集中从而在该层产生更加复杂的构造活动（如破裂等）。

其次，通过位移场定量分析进一步揭示（图 8c，表 4），软弱层厚度增加会强化垂向变形解耦效应：在下伏构造沿着断层面向上逆冲时，除第 2 层与第 3 层沿着断层面向上逆冲从而吸收了一部分水平位移外，软弱层中产生了较大的水平位移变化。这体现在软弱层具有塑性流动的特征，在下伏构造向上逆冲时，软弱层顶部减薄并向两翼流动，从而导致以软弱层为界上/下构造产生分层变形，且能够直观地看出软弱层越厚，这种分层变形的现象越明显。同时，对 3 组不同厚度软弱层模型中的第 4 层与第 6 层模拟结果的几何参数进行测量（表 4），结果显示随着软弱层厚度的增大，上/下构造半波波长之差与褶皱幅度之差均越来越大，而软弱层上覆褶皱两翼的倾角随之变小。因此，可以认为软弱层厚度的变化对其上/下发育的褶皱变形具有一定的影响，主要



a—厚度为 200 m、150 m 和 70 m 时软弱层的最大主应力分布图；b—厚度为 200 m、150 m 和 70 m 时软弱层的等效塑性应变分布图；c—软弱层厚度为 200 m、150 m 和 70 m 时的位移分布图

图 8　不同厚度软弱层应力−应变分布及位移分布图

Fig. 8　Stress–strain distribution and displacement distribution within weak layers with varying thicknesses

(a) Maximum principal stress distribution within weak layers of 200 m, 150 m, and 70 m thickness; (b) Equivalent plastic strain distribution within weak layers of 200 m, 150 m, and 70 m thickness; (c) Displacement distribution for weak layers of 200 m, 150 m, and 70 m thickness

体现在对褶皱的波长、波幅与两翼倾角的控制。具体来说，软弱层厚度越大，其上覆发育褶皱的波长相对于软弱层下的构造就越长，波幅越小，上覆背斜形态越宽缓；而软弱层厚度越小，其上覆发育褶皱的波长与软弱层下的构造变形程度越接近，软弱层仅起到调节作用，对上/下构造变形影响较小。

表 4　不同厚度软弱层模型第 4 层与第 6 层几何参数表

Table 4　Geometric parameters of Layer 4 and Layer 6 in models with weak layers of varying thicknesses

软弱层厚度/m	层数	w/m	A/m	F/(°)	β/(°)
70 m	第4层	1584.5	96.64	13.88	23.14
	第6层	2501.5	77.45	6.10	7.45
150 m	第4层	1622.5	99.79	14.29	23.78
	第6层	2742.6	71.70	5.91	7.16
200 m	第4层	1630.8	102.57	15.58	24.60
	第6层	3017.4	69.06	5.77	6.68

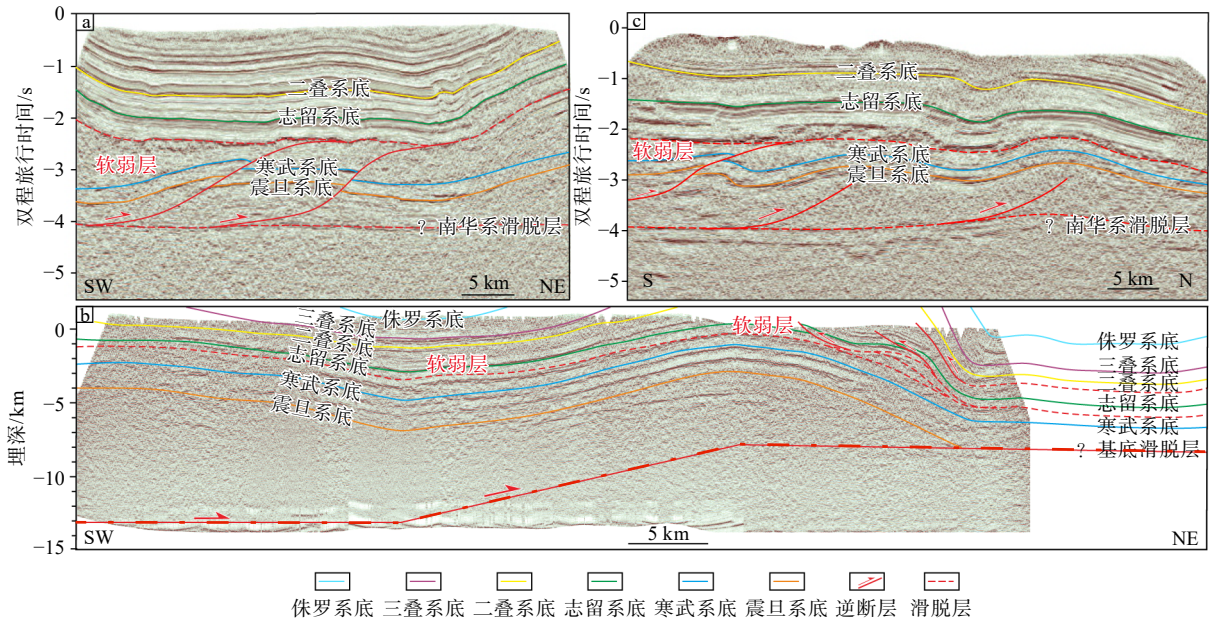
注：w—半波长；A—褶皱幅度；β—前翼倾角；F—后翼倾角

基于数值模拟揭示的软弱层厚度对逆冲构造变形的控制规律，选取四川盆地东南部（川东南）地区典型地球物理剖面进行验证（图 9）：从川东南地区良村北东—南西向剖面（图 9a）可以看出，下伏发育逆冲断层，产生明显的构造变形，而中—下寒武发育一套较厚的膏岩层，吸收了下伏构造产生的变形，并在局部产生增厚与减薄的现象，导致上覆构造变形较为平缓，从而形成了以中—下寒武系为界的上/下变形产生分层解耦现象；从川南地区长宁的北东—南西向剖面（图 9b）可以看到，基底发育断层转折褶皱，褶皱变形较为明显，而在中寒武统发育一套非常薄的泥岩层，但该层并未明显吸收下伏构造变形，仅起到过渡作用，且上/下构造变形较为一致；而从川东南地区焦石坝南北向剖面（图 9c）可以看到下伏产生一系列的逆冲断层，构造变形较为明显，但寒武系膏岩层的厚度在上述 2 个实例之间，因此可以看出在南侧上/下变形产生了分层解耦而北侧却有继承性。因此，通过与实际地球物理资料所观察到的实际地质现象对比分析认为上述模拟结果较为可靠。

综上所述，通过对不同厚度软弱层模型模拟结果以及实际地球物理资料的分析认为，软弱层厚度变化对构造变形影响较大。具体表现为：软弱层越厚，以软弱层为界，越容易产生上/下分层变形，且由于软弱层的塑性流变的性质，导致其上覆构造相对于下伏构造较为宽缓；而软弱层越薄，软弱层上/下构造变形分层性越不明显，其仅起到过渡的作用。

5　结论

（1）软弱层通过应力吸收与应变解耦主导分层变形。在侧向挤压条件下，软弱层发生塑性流动并



a—川东南地区良村北东—南西向剖面；b—川东南地区焦石坝南北向剖面；c—川南地区长宁北东—南西向剖面（据何登发等，2019b 修改）

图 9 软弱层控制构造变形实例

Fig. 9 Examples of structural deformation controlled by weak layers

(a) NE–SW profile of the Liangcun area, southeast Sichuan; (b) SEN profile of the Jiaoshiba area, southeast Sichuan;(c) NE–SW profile of the Changning area, south Sichuan (modified after He, 2019)

伴随局部的增厚与减薄，其对下伏构造变形与应力、应变具有显著的吸收作用，从而以软弱层为界上/下构造分层发生差异变形且应力−应变解耦的现象。

（2）软弱层厚度是控制变形样式的关键参数。这主要体现在软弱层越厚，其上覆褶皱越宽缓，下伏褶皱越陡窄，且分层变形的特征越明显；软弱层越薄，其上/下构造变形差异越小，软弱层仅起到过渡的作用。

（3）以川东南地区良村、焦石坝以及长宁等地为例，其所揭示的软弱层对构造变形的影响可为其他类似地区的构造变形解析与动力学分析提供较好的参考依据。

References

BAO H P, WANG Q P, YAN W, et al., 2023. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of the Ordovician carbonate-evaporite paragenesis system in central and eastern Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 30(1): 30-44. (in Chinese with English abstract)

CAO H Y, XU Z X, GAO J J, et al., 2024. Genesis and distribution laws of reservoirs of Cambrian Xixiangchi Group in southeastern Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 31(1): 50-59. (in Chinese with English abstract)

DUAN Y J, LUO H Y, XIE H W, et al., 2021. Salt-related structural characteristics and deformation mechanism of the Zhongqiu-Dongqiu section of the Qiulitag structural belt, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 32(7): 993-1008. (in Chinese with English abstract)

DUAN Y J, HUANG S Y, LUO C M, et al., 2023. Discussion on balance restoration of salt structure deformation and related problems in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 34(5): 780-793. (in Chinese with English abstract)

DUAN Y J, HUANG S Y, LUO C M, et al., 2024. Tectonic deformation characteristics of multi-detachment beds in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 35(9): 1544-1556. (in Chinese with English abstract)

ERICKSON S G, STRAYER L M, SUPPE J, 2005. Numerical modeling of hinge-zone migration in fault-bend folds(Article)[J]. AAPG Memoir, (82): 438-452.

GU Z D, YIN J F, YUAN M, et al., 2015. Accumulation conditions and exploration directions of natural gas in deep subsalt Sinian-Cambrian System in the eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 42(2): 137-149. (in Chinese with English abstract)

HE D F, LI D S, ZHANG G W, et al., 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606. (in Chinese with English abstract)

HE D F, LI D S, HE J Y, et al., 2013. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and Southwest depression in Tarim Basin and its exploration significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(2): 201-218. (in Chinese with English abstract)

HE D F, SHAO D B, KAI B Z, et al., 2019a. Structural style and trap distribution in Majiatan area on the western margin of ordos basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 219-235. (in Chinese with English abstract)

HE D F, LU R Q, HUANG H Y, et al., 2019b. Tectonic and geological background of the earthquake hazards in Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 993-1006. (in Chinese with English abstract)

HE D F, 2022. Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydro-carbon occurrence[J]. Earth Science Frontiers, 29(6): 24-59. (in Chinese with English abstract)

HU C B, ZHOU Y J, CAI Y E, 2009. A new finite element model in studying earthquake triggering and continuous evolution of stress field[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(7): 994-1004.

HUDEC M R, JACKSON M P A, 2006. Advance of allochthonous salt sheets in passive margins and orogens[J]. AAPG Bulletin, 90(10): 1535-1564.

JIA X L, 2016. Structural Geometry and Kinematics of Southeastern Sichuan: Tectonic Relationships with the Western Xuefeng Mountain[D]. China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

JIANG Q C, LI J Z, WANG Z C, et al., 2022. Quantitative thickness prediction of Cambrian gypsum-salt rocks in eastern Sichuan Basin and its petroleum significance[J]. Natural Gas Industry, 42(5): 34-46. (in Chinese with English abstract)

KHALIFEH-SOLTANI A, ALAVI S A, GHASSEMI M R, et al., 2023. Stress and strain evolution in fault-related folds: insights from 2D geomechanical modelling[J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1249446.

LI B L, SUN Y, ZHU W B, et al., 2001. Study on the layer-slip parameter systems in the eastern Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 23(1): 29-33. (in Chinese with English abstract)

LI C S, YIN H W, WU Z Y, et al., 2021. Effects of salt thickness on the structural deformation of foreland fold-and-thrust belt in the Kuqa Depression, Tarim Basin: insights from discrete element models[J]. Frontiers in Earth Science, 9: 655173.

LIN L B, HAO Q, YU Y, et al., 2014. Development characteristics and sealing effectiveness of Lower Cambrian gypsum rock in Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 718-726. (in Chinese with English abstract)

MA J, HE D F, ZHANG W K, et al., 2024. Numerical simulation of present-day stress field on the top surface of Ordovician Wufeng Formation shale in the Shilongxia anticline area, southeast Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geology, 59(3): 792-803. (in Chinese with English abstract)

PANG Y Z, CHENG K Q, ZHANG P X, et al., 2025. Simulation of paleotectonic stress field of Silurian Longmaxi shale reservoirs in Wulong area of southeastern Chongqing[J]. Acta Seismologica Sinica, 47(1): 73-92. (in Chinese with English abstract)

PLOTEK B, GUZMÁN C, CRISTALLINI E, et al., 2021. Analysis of fault bend folding kinematic models and comparison with an analog experiment[J]. Journal of Structural Geology, 146: 104316.

SUPPE J, 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science, 283(7): 684-721.

TONG H M, ZHANG H X, HOU Q L, et al., 2024. Generalized fracturing activation criteria[J]. Journal of Geomechanics, 30(1): 3-14. (in Chinese with English abstract)

WANG L, WU Z Y, YIN H W, et al., 2021. Compressional salt structures of salt-bearing sedimentary basins and its significance to hydrocarbon accumulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(5): 136-150. (in Chinese with English abstract)

WANYAN Q Q, SHEN X M, GOU Y X, et al., 2016. The analysis of the mechanical properties of typical salt rock[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 38(1): 60-67. (in Chinese with English abstract)

WEI J, HOU G T, ZHANG B, et al., 2014. Insights into the damage zones in fault-bend folds from geomechanical models and field data[J]. Tectonophysics, 610: 182-194.

WU Z Y, YANG X L, YIN H W, et al., 2023. Characteristics and influencing factors of salt structure evolution in Awate transfer zone, western Kuqa depression[J]. Earth Science, 48(4): 1271-1287. (in Chinese with English abstract)

XIE J T, FU X P, QIN Q R, et al., 2021. Prediction of fracture distribution and evaluation of shale gas preservation conditions in Longmaxi Formation in Dongxi area[J]. Coal Geology & Exploration, 49(6): 35-45. (in Chinese with English abstract)

XU B T, YAN C H, CHEN H Y, et al., 2008. Experimental study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 29(11): 3077-3081. (in Chinese with English abstract)

XU K, DAI J S, FENG J W, et al., 2015. Application of ANSYS in discussing influence of weak interbed on rock fracture[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 22(6): 735-739. (in Chinese with English abstract)

XU W L, LI J Z, LIU X S, et al., 2021. Accumulation conditions and exploration directions of Ordovician lower assemblage natural gas, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 549-561. (in Chinese with English abstract)

YANG K J, QI J F, LIU A R, et al., 2022. Characteristics of basement faults in the middle section of Kuqa Depression and their influence on salt tectonic deformation[J]. Chinese Journal of Geology, 57(4): 991-1008. (in Chinese with English abstract)

YANG X L, 2023. Physical Modeling on the deformation evolution of compressional salt structures in the western Kuqa depression[D]. Fuzhou: East China University of Technology. (in Chinese with English abstract)

YANG X P, CHEN J, LI A, et al., 2024. Structural deformation characteristics of active anticline and their implications for seismogeological disaster effect under compression setting in the Late Cenozoic[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 225-241. (in Chinese with English abstract)

YIN L, LUO G, 2018. Crustal deformation across the Longmen Shan fault zone from finite element simulation of seismic cycles[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(4): 1238-1257. (in Chinese with English abstract)

YUAN J, ZHU S B, 2014. FEM simulation of the dynamic processes of fault spontaneous rupture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(1): 138-156. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B L, ZHU G, JIANG D Z, et al., 2009. Numerical modeling and formation mechanism of the eastern Sichuan Jura-type folds[J]. Geological Review, 55(5): 701-711. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X L, LIU Z J, CHEN C, et al., 2023. Differences in preservation conditions of deep shale gas in high-steep complex tectonic belt: taking Qijiang high-steep complex tectonic belt in southeast Sichuan as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 45(6): 1121-1131. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z Q, LI N, CHEN F F, et al., 2010. A practical method to simulate

thickness of weak interbed and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(S1): 2637-2644. (in Chinese with English abstract)

ZHAO L, LIAO Z T, XU X H, et al. , 2019. Physical modeling of thrusting structure zonation in front of an intracontinental orogen[J]. Petroleum Geology & Experiment, 41(6): 871-878, 884. (in Chinese with English abstract)

ZHAO S X, XU W Q, YANG X F, et al., 2023. Structural characteristics and deformation mechanisms of multiple-detachments in Luzhou area, southeastern Sichuan Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 29(5): 726-734. (in Chinese with English abstract)

ZHAO W Z, HU S Y, WANG Z C, et al., 2003. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 30(5): 1-5. (in Chinese with English abstract)

ZHONG C, QIN Q R, ZHOU J L, et al., 2018. Study on fault sealing of organic-rich shale by present stress: a case study of Longmaxi formation in Dingshan area, southeast Sichuan[J]. Journal of Geomechanics, 24(4): 452-464. (in Chinese with English abstract)

ZHOU S H, ZHANG H, SUN Y Q, et al., 2023. Numerical simulation of tectonic stress and strain rate fields in the northeastern margin of the Tibetan Plateau in association with major fault zones[J]. Science China Earth Sciences, 66(10): 2353-2367.

ZU K W, ZENG L B, ZHAO X Y, et al., 2014. Discussion on development models of the shearing fractures in fault bend folds[J]. Journal of Geomechanics, 20(1): 16-24. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

包洪平, 王前平, 闫伟, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系碳酸盐岩-膏盐岩体系沉积特征与天然气成藏潜力[J]. 地学前缘, 30(1): 30-44.

曹环宇, 徐祖新, 高俊杰, 等, 2024. 川东南地区寒武系洗象池群储层成因及分布规律[J]. 断块油气田, 31(1): 50-59.

段云江, 罗浩渝, 谢会文, 等, 2021. 塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带中秋—东秋段盐相关构造特征及变形机理[J]. 天然气地球科学, 32(7): 993-1008.

段云江, 黄少英, 罗彩明, 等, 2023. 塔里木盆地库车坳陷盐构造变形平衡恢复及相关问题讨论[J]. 天然气地球科学, 34(5): 780-793.

段云江, 黄少英, 罗彩明, 等, 2024. 塔里木盆地库车前陆冲断带多滑脱层构造变形特征[J]. 天然气地球科学, 35(9): 1544-1556.

谷志东, 殷积峰, 袁苗, 等, 2015. 四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 42(2): 137-149.

何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589-606.

何登发, 李德生, 何金有, 等, 2013. 塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. 石油学报, 34(2): 201-218.

何登发, 邵东波, 开百泽, 等, 2019a. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律[J]. 地球学报, 40(1): 219-235.

何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等, 2019b. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发, 46(5): 993-1006.

何登发, 2022. 中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律[J]. 地学前缘, 29(6): 24-59.

胡才博, 周一杰, 蔡永恩, 2009. 如何用有限元新模型研究地震触发和应力场连续演化[J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 39(5): 546-555.

贾小乐, 2016. 川东南构造几何学与运动学特征及其与雪峰山西段的构造关系探讨[D]. 中国地质大学(北京).

江青春, 李建忠, 汪泽成, 等, 2022. 四川盆地东部地区寒武系膏盐岩厚度定量预测及其油气地质意义[J]. 天然气工业, 42(5): 34-46.

李本亮, 孙岩, 朱文斌, 等, 2001. 川东地区层滑参数系统研究[J]. 西南石油学院学报, 23(1): 29-33.

林良彪, 郝强, 余瑜, 等, 2014. 四川盆地下寒武统膏盐岩发育特征与封盖有效性分析[J]. 岩石学报, 30(3): 718-726.

马佳, 何登发, 张伟康, 等, 2024. 川东南石龙峡背斜区奥陶系五峰组页岩顶面现今应力场数值模拟研究[J]. 地质科学, 59(3): 792-803.

庞一桢, 陈孔全, 张培先, 等, 2025. 渝东南武隆地区志留系龙马溪组页岩储层的古构造应力场模拟[J]. 地震学报, 47(1): 73-92.

童亨茂, 张宏祥, 侯泉林, 等, 2024. 广义破裂活动准则[J]. 地质力学学报, 30(1): 3-14.

完颜祺琪, 沈雪明, 垢艳侠, 等, 2016. 典型盐岩力学特性分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 38(1): 60-67.

王莉, 吴珍云, 尹宏伟, 等, 2021. 含盐沉积盆地挤压盐构造及其对油气成藏的意义[J]. 地质科技通报, 40(5): 136-150.

吴珍云, 杨秀磊, 尹宏伟, 等, 2023. 库车坳陷西段阿瓦特构造转换带盐构造演化特征及影响因素[J]. 地球科学, 48(4): 1271-1287.

谢佳彤, 付小平, 秦启荣, 等, 2021. 川东南东溪地区龙马溪组裂缝分布预测及页岩气保存条件评价[J]. 煤田地质与勘探, 49(6): 35-45.

许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等, 2008. 边坡岩体软弱夹层力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 29(11): 3077-3081.

徐珂, 戴俊生, 冯建伟, 等, 2015. 运用ANSYS法探讨软弱夹层对岩体破裂的影响[J]. 断块油气田, 22(6): 735-739.

徐旺林, 李建忠, 刘新社, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地奥陶系下组合天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 48(3): 549-561.

杨克基, 漆家福, 刘傲然, 等, 2022. 库车坳陷中段基底断裂特征及其对盐构造变形的影响[J]. 地质科学, 57(4): 991-1008.

杨晓平, 陈杰, 李安, 等, 2024. 新生代晚期挤压作用下活动背斜区的构造变形特征及其地震地质灾害效应[J]. 地质力学学报, 30(2): 225-241.

杨秀磊, 2023. 库车坳陷西段挤压盐构造变形演化过程的物理模拟实验研究[D]. 抚州: 东华理工大学.

尹力, 罗纲, 2018. 有限元数值模拟龙门山断裂带地震循环的地壳变形演化[J]. 地球物理学报, 61(4): 1238-1257.

袁杰, 朱守彪, 2014. 断层自发破裂动力过程的有限单元法模拟[J]. 地球物理学报, 57(1): 138-156.

张必龙, 朱光, JIANG D Z, 等, 2009. 川东“侏罗山式”褶皱的数值模拟及成因探讨[J]. 地质论评, 55(5): 701-711.

张旭亮, 刘珠江, 陈超, 等, 2023. 高陡复杂构造带深层页岩气保存条件差异性分析: 以川东南綦江高陡复杂构造带为例[J]. 石油

实验地质，45(6)：1121-1131.

张志强，李宁，陈方方，等，2010. 软弱夹层厚度模拟实用方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报，29(S1)：2637-2644.

赵利，廖宗廷，徐旭辉，等，2019. 陆内山前冲断结构分带的构造物理模拟实验[J]. 石油实验地质，41(6)：871-878, 884.

赵圣贤，徐雯峤，杨学锋，等，2023. 川东南泸州地区多滑脱层构造特征及变形机制[J]. 高校地质学报，29(5)：726-734.

赵文智，胡素云，汪泽成，等，2003. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用[J]. 石油勘探与开发，30(5)：1-5.

钟城，秦启荣，周吉羚，等，2018. 现今地应力对富有机质页岩断层封闭性的研究：以川东南丁山地区龙马溪组为例[J]. 地质力学学报，24(4)：452-464.

周书红，张怀，孙云强，等，2023. 青藏高原东北缘与主要断裂带相关的构造应力率和应变率场的数值模拟[J]. 中国科学：地球科学，53(10)：2392-2406.

祖克威，曾联波，赵向原，等，2014. 断层转折褶皱剪切裂缝发育模式探讨[J]. 地质力学学报，20(1)：16-24.