

川中古隆起西北斜坡断裂-褶皱发育特征及差异构造变形机制

裴仰文^{1,2}, 孙昊^{1,2}, 赵庆奇^{1,2}, 邓拓^{1,2}, 苗正硕^{1,2}

1. 深层油气全国重点实验室（中国石油大学（华东）），山东青岛，266580

2. 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东青岛 266580

摘要：川中古隆起西北斜坡构造变形复杂，明确其构造变形主控因素并揭示差异构造变形机制对于深化四川盆地构造演化认识和指导油气勘探部署至关重要。本研究以川中古隆起西北斜坡区为研究对象，基于高精度三维地震资料与钻井数据，精细刻画断裂-褶皱构造特征，明确了中下三叠统两套膏盐岩层空间展布特征及其与上覆构造变形之间的耦合关系，揭示了研究区差异构造变形机制。研究结果表明：

（1）研究区构造变形具有明显的平面分区特征，北部为褶皱主导变形区，西部为断裂主导变形区，南部为弱变形区；（2）膏盐岩厚度空间分布与上覆地层构造样式存在一定的耦合关系，膏盐岩较厚时发育宽缓盐背斜或前翼突破型紧闭盐背斜，膏盐岩较薄时发育对冲型断层、单冲型断层或小型调节断层；（3）综合考虑膏盐岩层空间分布与造山带向盆地的挤压两个影响因素，提出了“膏盐岩层厚薄-应力强弱”双因素控制下的差异构造变形机制。

关键词：构造分区；膏盐岩；盆向挤压；变形机制

中图分类号：P618.13

收稿日期：2025-12-17

Fault-Fold Development Characteristics and Differential Structural Deformation Mechanisms in the Northwestern Slope of the Central Paleo-Uplift, Sichuan Basin

PEI Yangwen^{1,2}, SUN Hao^{1,2}, ZHAO Qingqi^{1,2}, DENG Tuo^{1,2}, MIAO Zhengshuo^{1,2}

1. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract: The northwestern slope of the Central Paleo-Uplift of the Sichuan basin presents complicated deformation features with high-level of structural variation. This research aims to evaluate the controlling factors and reveal the differential deformation mechanism, as it is important for improving our understanding in tectonic evolution and oil/gas exploration of the Sichuan Basin. In this research, the fault-fold structural features were characterized in both section view and plane view by integrating high-resolution 3D seismic data

基金项目：新型油气勘探开发国家科技重大专项“四川盆地全油气系统与新领域勘探技术”（2025ZD1400400），国家自然科学基金面上项目“含油气盆地深层亚地震断层变形机制及其储层改造作用：以莺琼盆地为例”（42272147），山东省泰山学者青年专家项（tsqn202211081）。

第一作者：裴仰文（1986-），男，教授，博士，博士生导师，主要从事含油气盆地分析和油区构造解析研究。E-mail: peiyangwen@upc.edu.cn

and drilling data. The spatial distribution of two Lower-Middle Triassic evaporite layers was then mapped to identify the control on the structural deformation in the overlying sequences. The differential structural deformation mechanism of the study area was revealed. The conclusions are drawn as below. (1) The fault-fold structures present high-level spatial variation, with folding dominated northern area, faulting dominated western area, and weak deformation southern area. (2) Significant relationship was observed between the spatial distribution of evaporites and structural styles of their overlying strata. Open salt anticlines or tight salt anticlines with forelimb breakthrough were developed in areas with thicker evaporites, whereas back-thrust faults, single thrust faults or small accommodation faults were developed in areas with thinner evaporites. (3) By integrating the spatial distribution of evaporites and basinward contraction, geological models of "evaporites' thickness and stress intensity" were proposed to reveal the differential structural deformation mechanism of the study area.

Keywords: structural zonation; evaporite layers; basinward contraction; deformation mechanism.

引言

四川盆地盆山系统记录了自新元古代以来的多旋回构造叠加,经历了复杂的盆地演化(张国伟等, 2013),该盆地是探索扬子板块动力学机制的天然窗口,也是我国油气勘探的战略靶区(Hu et al., 2020; 何治亮等, 2021)。四川盆地周缘造山带多期次的叠加改造(魏国齐, 2019; 梁瀚等, 2022; Yin et al., 2024; Huang et al., 2025)对盆地形成演化和构造变形具有重要控制作用,也导致盆内不同区带构造变形呈现显著的空间差异。此外,前人针对四川盆地盆内差异构造变形,采用精细地震解译、构造物理模拟、应力应变数值模拟等手段开展了大量研究,发现盆内多套区域性膏盐岩层的发育对构造变形具有重要影响:膏盐岩层作为关键构造界面,导致其上、下构造层发生明显解耦(Ruh et al., 2012; 魏峰等, 2019; 何登发等, 2023),膏盐岩发育区以宽缓箱状滑脱褶皱变形为主,不发育区则以叠瓦状逆冲断层及断层相关紧闭褶皱为主(谢会文等, 2012);膏盐岩厚度及空间展布是控制上覆地层构造样式的首要因素,当膏盐岩层较厚且连续分布时,塑性流动能充分吸收构造缩短量,形成膏盐岩相关背斜(后文简称为“盐背斜”)等褶皱构造,反之则更易发生脆性断裂(Stewart, 1996; 唐鹏程等, 2015);而当同时发育多套膏盐岩层时,埋深较大的膏盐岩层滑脱作用更为明显,且滑脱强度与缩短速率呈反比(裴仰文等, 2022; 屈梦雪等, 2023)。

川中古隆起西北斜坡是四川盆地重要的致密气产区,该地区构造变形受盆地西缘龙门山、北缘米仓-大巴山控制,并广泛发育下三叠统嘉陵江组四段(T_{ij}^4)与中三叠统雷口坡组(T_{2l})两套膏盐岩层(魏国齐, 2019; 何登发等, 2023; 梅庆华等, 2014),导致三叠系、侏罗系构造变形复杂多样。然而,该区断裂-褶皱-膏盐岩之间的耦合关系尚不明确,周缘构造应力和膏盐岩层联合控制下的构造变形机制尚不清晰,亟待开展深入研究。因此,本研究以川中古隆起西北斜坡为靶区,基于高分辨率三维地震与钻井数据,精细刻画断裂-褶皱系统展布,提取两套膏盐岩层厚度并分析其空间分布,结合方差属性揭示膏盐岩层与上覆构造样式的耦合关系,最后综合探讨了周缘构造应力与膏盐岩层联合控制下的差异构造变形机制。

1 地质背景

自显生宙以来,华北板块、扬子板块和羌塘板块间,经历了两次重大大陆碰撞事件:晚三叠世华北地块、羌塘地块与扬子地块碰撞;新生代印度-欧亚板块持续汇聚(任纪舜等, 2004; 李智武, 2006; 栗兵帅等, 2022)。这两期碰撞作用不仅产生强烈的逆冲-褶皱变形与地壳缩短,更塑造了如今多旋回前陆盆地系统及其伴生的褶皱冲断带体系。四川盆地位于上扬子地区,受控于华北板块、羌塘板块与扬子板块间相互作用(图1),经历了多期构造叠加改造,形成了复杂的盆-山构造系统(Miao et al., 2022; Feng et al., 2023)。

四川盆地周缘被多个造山带所围限,北部以米仓山-大巴山造山带为界,东部及东南部毗邻齐岳山-大娄山造山带,西南为大凉山造山带,西北部发育龙门山断褶带与邛崃山造山带;盆地内部可划分为五个一级构造单元:川中古隆起、川西坳陷、川北坳陷、川东褶皱带

与川南褶皱带(图1),形成山前坳陷与褶皱带围限中央隆起区的构造特征(魏国齐等,2019)。四川盆地经历了多期次、多性质的叠加改造:三叠纪之前主要受控于差异隆升运动形成了初始构造格局;三叠纪以来相继经历印支期、燕山期和喜马拉雅期的改造(图1),形成了多期构造叠加的复杂盆内构造体系(殷积峰等,2013;魏国齐等,2019; Miao et al., 2022)。在川中地区,由于西侧龙门山和北侧米仓山-大巴山隆升导致的向盆地的挤压应力传递至川中地区时已有明显衰减,且该地区深部前寒武纪刚性基底对构造变形具有一定的约束作用,导致川中地区整体变形强度较弱,未发育大规模逆冲推覆构造或强烈褶皱(汪泽成等, 2012; Yin et al., 2024),以发育低级序断裂与宽缓褶皱为主(卞从胜等,2009)。

川中地区三叠纪以来沉积序列较为完整,中、下三叠统以发育海相碳酸盐岩为主,自上三叠统开始逐步过渡为陆相砂泥岩沉积(图1),且在三叠系内部发育嘉陵江组四段(T_{1j}^4)与雷口坡组(T_{1l})两套膏盐岩。两套膏盐岩能干性明显弱于其上覆碎屑岩,其变形行为以塑性流变为主,与上覆碎屑岩中以断裂-褶皱为主的构造变形产生显著差异。

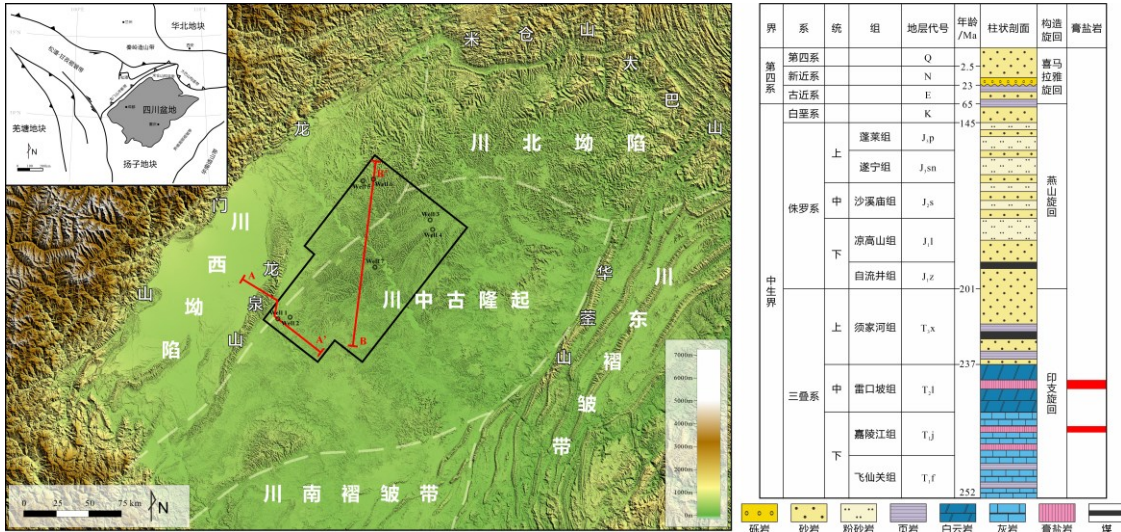


图 1 四川盆地周缘构造简图及地层综合柱状图

Fig. 1 Structural map of the Sichuan basin and generalized stratigraphic column

2 断裂-褶皱构造特征

研究区位于川中古隆起、川西坳陷与川北坳陷三大构造单元过渡带,构造变形复杂且具有显著平面差异性(图1)。本节选取A-A'、B-B'两条典型地震剖面(图2、3)和须家河组底界断裂-褶皱分布图(图4)剖析研究区三叠系、侏罗系断裂-褶皱构造变形特征及空间差异。

2.1 剖面构造特征

北西-南东向剖面A-A'位于研究区南部,自西向东依次穿过龙泉山前缘冲断带与川中古隆起西斜坡。剖面北西段构造变形强烈,发育一套以中三叠统雷口坡组(T_{1l})膏盐岩层为主滑脱面的逆冲-反冲断层系统,断层向上切穿侏罗系并出露地表,指示晚期的强烈构造活动

（刘树根等，2011；于佳男等，2013）。自龙泉山向南东方向构造变形强度逐渐减弱，至剖面末端地层产状已趋于平缓，逐渐过渡为川中古隆起弱变形域，褶皱变形不明显，以发育低级序断层为主。这些低级序断层下端多源自中、下三叠统膏盐岩，向上终止于上三叠统须家河组内部，少量向上切入侏罗系。显然，剖面A-A'中褶皱-断裂构造变形受到中、下三叠统两套膏盐岩滑脱作用的控制，膏盐岩层的存在决定了断层的初始发育层位，中三叠统雷口坡组（T₂l）膏盐岩层的滑脱解耦也导致部分断层产生了垂向分段现象。

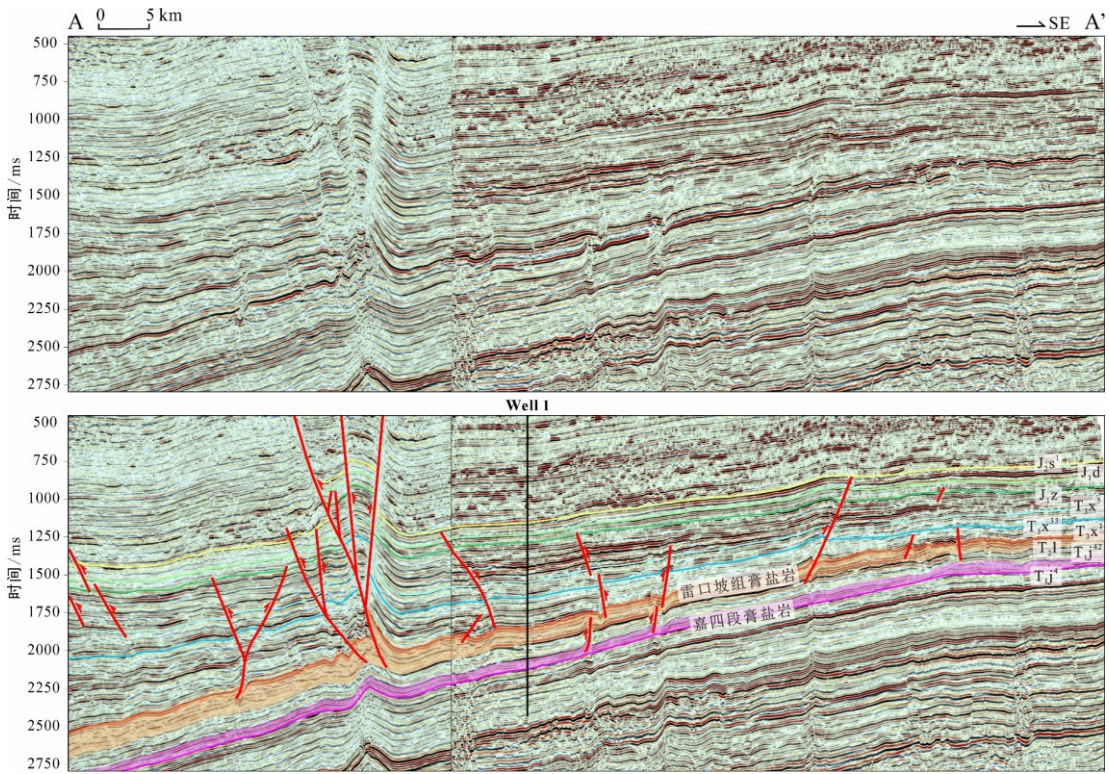


图 2 川中古隆起西北斜坡 A-A'剖面解译方案（测线位置见图 1）

Fig. 2 Structural interpretation of section A-A' (see location in Fig. 1)

南北向剖面B-B'贯穿研究区，剖面中各地层均呈现南高北低的特征，两套膏盐岩厚度自南向北逐渐加厚。剖面南段位于研究区东南部，膏盐岩层厚度较薄，构造变形较弱，仅发育少量规模较小的断层，起源于中三叠统雷口坡组（T₂l）膏盐岩，向上切穿层位有限，多终止于须家河组内部，下三叠统嘉陵江组四段（T₂j⁴）膏盐岩未对构造变形起到明显控制作用。在剖面中段，随着膏盐岩层向北逐渐增厚，开始发育一系列受控于下三叠统嘉陵江组四段（T₂j⁴）膏盐岩塑性流动的构造变形，膏盐岩在褶皱核部聚集形成小型盐丘，上覆地层被动

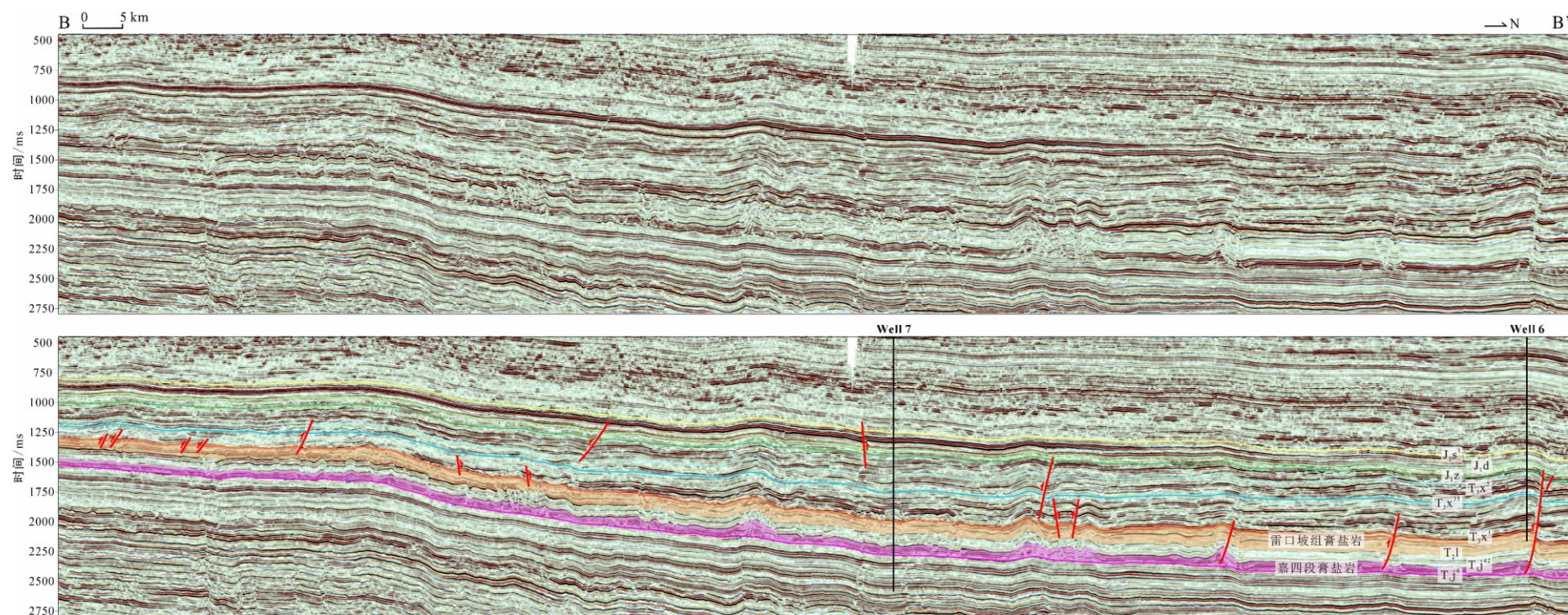


图 3 川中古隆起西北斜坡 B-B'剖面解译方案（测线位置见图 1）

Fig. 3 Structural interpretation of section B-B' (see location in Fig. 1)

变形形成宽缓背斜，并发育少量具有调节性质的低级序逆断层。在剖面北段，发育起源于下三叠统嘉陵江组四段（ T_{1j}^4 ）膏盐岩的两组断层传播褶皱，断面及褶皱轴面南伏，断层面上传播至须家河组，并在断层上盘形成前翼陡、后翼缓的传播褶皱，褶皱规模显著大于剖面中部。整体上，受膏盐岩层厚度自南向北逐渐加厚影响，剖面B-B'中构造样式逐渐由断裂主导过渡为褶皱主导，并在剖面北端转变为断层传播褶皱，且构造变形强度逐渐增加。

2.2 平面构造差异

基于断裂-褶皱剖面构造特征，以须家河组底（ T_{3x}^1 ）为代表开展平面构造解译，结合三维地震资料方差、三维应变等对构造响应敏感的属性，识别刻画189条逆冲断层（延伸长度2-25 km）和10个褶皱（延伸长度5-20 km）（图4、5）。须家河组底（ T_{3x}^1 ）整体呈现南高北低的构造趋势（落差高达~1200 ms），断裂-褶皱空间分布具有显著差异性：①断层全区分布，走向以北东向、近东西向和北西向为主，其中北东向断层主要分布在研究区西南部（B区），近东西向和北西向断层则主要分布在北部（A区）与东南部（C区）；②褶皱分布具有更高差异性，主要在北部（A区）发育，轴向以近东西向和北西向为主。

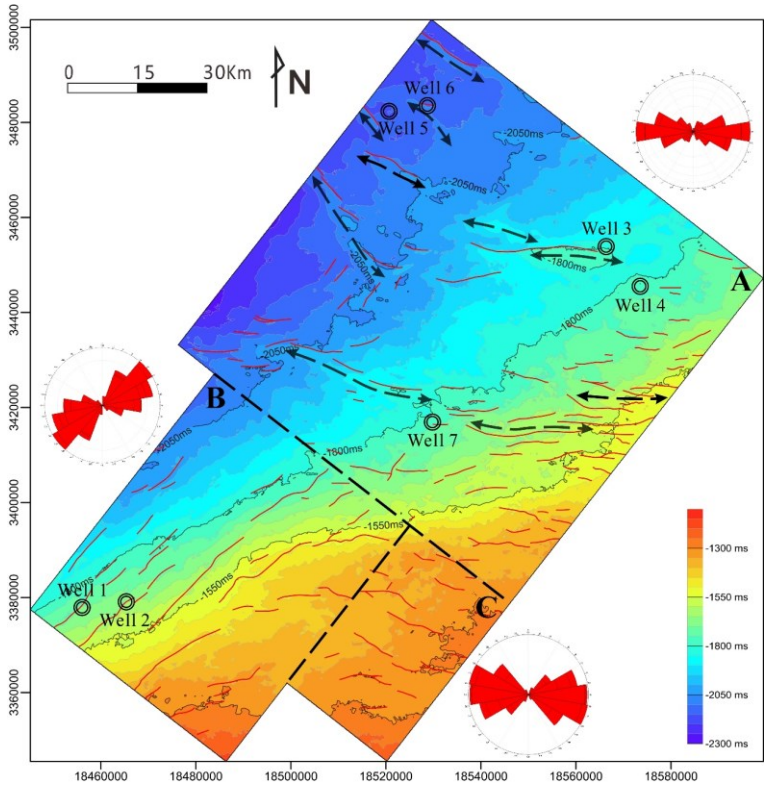


图4 川中古隆起西北斜坡地区须家河组底界断裂-褶皱分布图

Fig. 4 Structural map of the base of the Xujiahe Formation, northwestern slope of the Central Paleo-Uplift, Sichuan basin

为明确研究区构造变形空间差异特征，选取须一段（ T_{3x}^1 ）、须三三亚段（ T_{3x}^{33} ）、须五段（ T_{3x}^5 ）及珍珠冲组（ J_{1z} ）四个层位，对A、B、C三个区域断裂和褶皱的延伸长度进行分层定量统计，统计结果如图5所示。三个区域呈现显著构造差异：① A区断褶发育完全，

其中须一段 (T_3x^1) 发育最为强烈, 断层平均长度约2646 m, 褶皱长度普遍介于11000-15000 m, 向上至其他层位强度减弱, 该区整体表现为褶皱延伸规模远大于断层, 以褶皱优势发育为特征; ② B区以断裂发育为主, 断层长度普遍高于A、C区, 尤以须一段 (T_3x^1) 断层发育最多, 长度平均为4679 m, 向上数量逐渐减小, 平均长度维持在2500-4500 m, 褶皱仅在须一段 (T_3x^1) 和须三三三亚段 (T_3x^{33}) 发育, 且长度小于A区, 该区域以断裂活动主导为主要构造特征; ③ C区靠近川中古隆起, 构造变形最弱, 断裂延伸长度均值在1500-3000 m之间, 褶皱不发育。

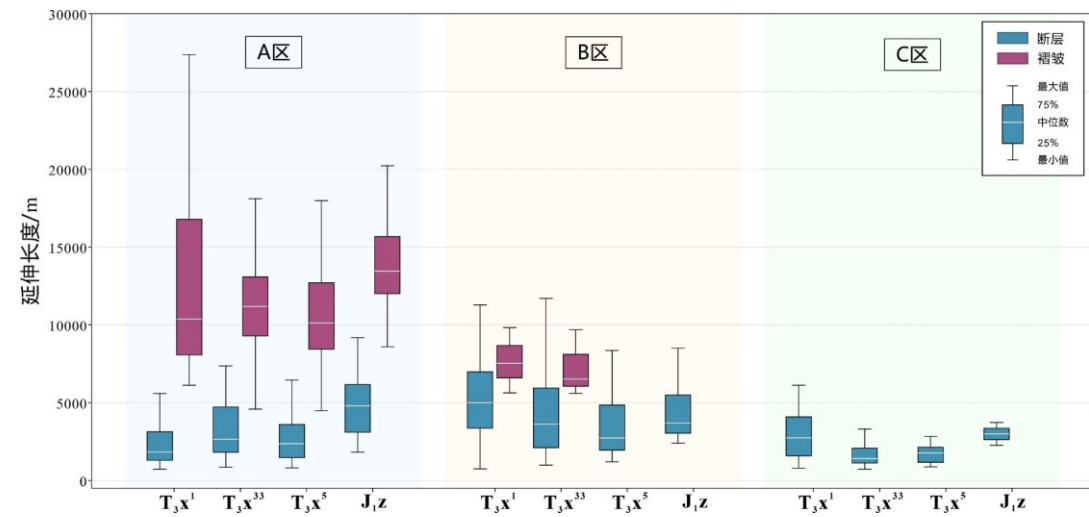


图 5 川中古隆起西北斜坡地区断裂-褶皱定量统计

Fig. 5 Quantitative statistics of faults and folds in the northwestern slope of the Central Paleo-Uplift, Sichuan basin

综合断裂-褶皱分布规律, 发现研究区不同地区构造变形特征存在显著差异, 结合平剖面构造特征和断层走向统计结果, 可将研究区划分为 (图4): ①褶皱主导区 (A区) 主要发育近东西向和北西向褶皱, 褶皱平面延伸长度由北至南逐渐加大, 并在埋深1800 ms以浅发育一定数量近东西向断层; ②断裂主导区 (B区) 主要发育北东向断层, 延伸长度和断距较大, 无明显褶皱发育; ③弱变形区 (C区) 整体构造变形较弱, 仅发育少量的近东西向断层, 断层延伸长度与断距较小。

3 膏盐岩层与断裂-褶皱构造耦合分析

鉴于研究区断裂-褶皱发育与膏盐岩层密切相关, 通过刻画下三叠统嘉陵江组四段 (T_{1j}^4) 和中三叠统雷口坡组 (T_{2l}) 膏盐岩层厚度, 结合其顶界面地震方差属性, 明确两套膏盐岩层纵向配置关系与盐上地层构造样式之间的耦合关系, 揭示研究区差异构造变形机制。

3.1 膏盐岩层空间分布规律

根据三维地震资料确定两套膏盐岩层顶底界面双程旅行时间差, 并利用钻井资料进行时深转换, 选取研究区7口贯穿目标层位的钻井资料, 提取嘉陵江组四段至雷口坡组的TWT与TVD数据, 每口井独立拟合二次多项式转换方程 ($TVD = a \cdot TWT^2 + b \cdot TWT + c$), 拟合优度

R²均大于0.99（表1）。将7口井的方程系数分别取平均值，得到研究区平均时深转换方程，并用于获得深度域厚度分布图（图6）。需要说明的是，由于时深转换基于单点数据外推至全区，且各井方程系数存在差异，平均化会引入一定误差，加之岩性横向变化，厚度计算存在不确定性。因此，厚度分析主要关注区域相对变化趋势，而非绝对厚度值。

表 1 研究区时深转换方程统计表

Table 1 Statistical table of time-depth conversion equations in the study area

井号	转换方程 (TVD = a·TWT ² + b·TWT + c)	R ²
Well 1	y = 5E-05x ² + 2.1595x - 168.49	0.9993
Well 2	y = 0.0005x ² + 0.9618x + 560.26	0.9995
Well 3	y = 0.0003x ² + 1.3608x + 277.26	0.9994
Well 4	y = 0.0003x ² + 1.355x + 273.25	0.9995
Well 5	y = 5E-05x ² + 2.1578x - 167.48	0.9993
Well 6	y = 9E-05x ² + 2.0059x + 10.346	0.9999
Well 7	y = 0.001x ² + 1.1727x + 23.149	0.9987

两套膏盐岩的分布具有显著的空间差异性，如厚度平面分布图显示：雷口坡组（T_{2l}）整体厚度大，空间连续性较好，厚度的高值区呈片状广泛分布于研究区褶皱主导区中北部，呈近东西与北西向展布，与发育的主要构造走向保持一致。在断裂主导区自北向南逐渐减薄，到弱变形区靠近古隆起一侧最薄（图6 a）。嘉陵江组四段（T_{2j}⁴）膏盐岩层相比于雷口坡组厚度整体较薄，空间连续性较差，表明该套膏盐岩层发生了较强侧向流动与塑性变形。在研究区的褶皱主导区，厚度相对较大，但非均质性增强，有明显的厚度梯度变化，平面上呈现为多个条带状、分散且相对孤立的高值区，走向以北西向或近东西向为主，与该区域发育的主体构造带走向一致。在研究区西南部的断裂主导区发育较薄，且厚度梯度平缓，整体分布均匀，仅局部发育少量北东向的线状高值异常，多与该区域发育的单冲断裂相关。靠近川中古隆起的弱变形区厚度较薄且均一（图6 b）。

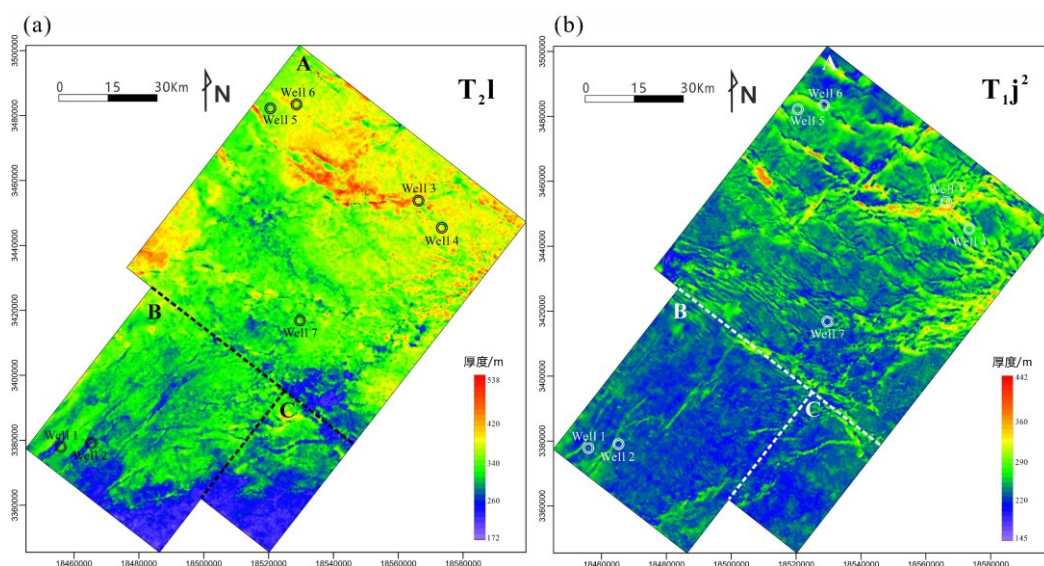


图 6 研究区膏盐岩层厚度分布图

(a) 中三叠统雷口坡组膏盐层, (b) 下三叠统嘉陵江组四段膏盐岩层

Fig. 6 Thickness of evaporite layers in the study area

(a) Middle Triassic Leikoupo Formation, (b) Lower Triassic Jialingjiang Formation (member 4)

对研究区三个区域两套膏盐岩层厚度进行定量统计, 结合平面分布特征, 揭示其纵向配置差异显著 (图7): ①褶皱主导区 (A区) 两套膏盐岩均较厚, 雷口坡组均值263.6 m, 嘉四段均值174.0 m, 厚度分布范围宽, 呈“双厚”叠置, 膏盐岩发生了较强的塑性流动与局部聚集, 褶皱与断裂显著发育; ②断裂主导区 (B区) 两套膏盐岩厚度减小, 雷口坡组均值207.3 m, 嘉四段均值142.2 m, 主体厚度跨度小, 横向分布平稳, 膏盐岩变形程度相对较低, 以断裂变形为主; ③弱变形区 (C区) 两套膏盐岩进一步减薄, 雷口坡组均值182.8 m, 嘉四段均值141.6 m, 厚度分布集中, 难以发生大规模塑性流动, 与微弱变形响应一致。

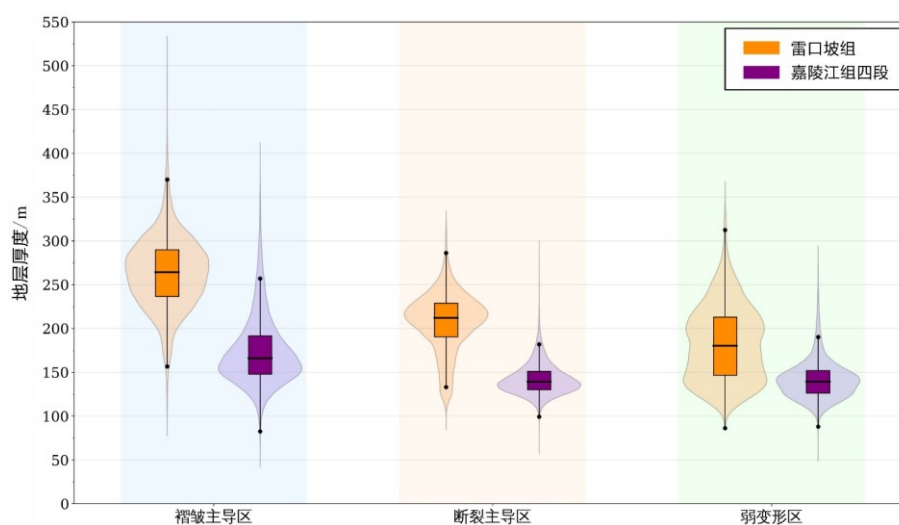


图 7 川中古隆起西北斜坡地区膏盐岩厚度分布小提琴图

Fig. 7 Violin plot of evaporite thickness distribution in the study area

3.2 膏盐岩层与构造样式耦合关系

前人研究表明,膏盐岩层作为挤压构造体系中应力传递和变形调节的关键载体,其空间分布特征对上覆构造变形样式具有显著影响。当膏盐岩层厚度较大且连续分布时,易通过塑性流动吸收构造缩短量,并在上覆地层中发育盐背斜(裴仰文等, 2022, Lewis et al., 2013, 唐鹏程等, 2015); 而当膏盐岩层较薄或分布不连续时,其塑性流动变得极为有限,其上覆地层则以脆性断裂变形为主(Stewart, 1996, 侯筱晓等, 2021, 于宝利等, 2025)。

基于研究区膏盐岩层厚度分布,对两套膏盐岩层顶界(T_{ij}^{42} 和 T_{3x}^1)进行地震方差属性分析。首先对三维地震数据体进行结构平滑($\text{Sigma X/Y/Z}=1.5$),增强同相轴连续性;然后计算方差属性,分析窗口3道 $\times$ 3道、垂向平滑15个样点、不进行倾角校正,以检测不连续性特征;最后沿层位精确提取方差体均方根振幅值(时窗0 ms),生成沿层方差属性图。对比分析不同区带典型构造样式及其对应的膏盐岩顶界方差响应,并对各构造发育部位的两套膏盐岩层厚度进行测量与时深转换,以定量揭示两套膏盐岩层纵向配置对盐上地层构造变形的控制作用。

(1) 褶皱主导区(A区)

褶皱主导区膏盐岩层纵向“双厚”配置,构造变形强度北强南弱,主要发育两种典型构造样式(图8):

①前翼突破型紧闭盐背斜(图8b):褶皱轴面南倾,北翼较陡南翼较缓,断层从盐背斜核部突破前翼并切入盐上地层,具有较高的变形强度,主要发育于褶皱主导区北部。下部膏盐岩在背斜核部显著聚集,其顶界(T_{ij}^{42})地震方差属性呈带状响应(图8a);上部膏盐岩层厚度未发生明显变化,仅被动参与褶皱变形,且前翼被突破断层错断,其顶界(T_{3x}^1)地震方差属性呈线状响应(图8a)。

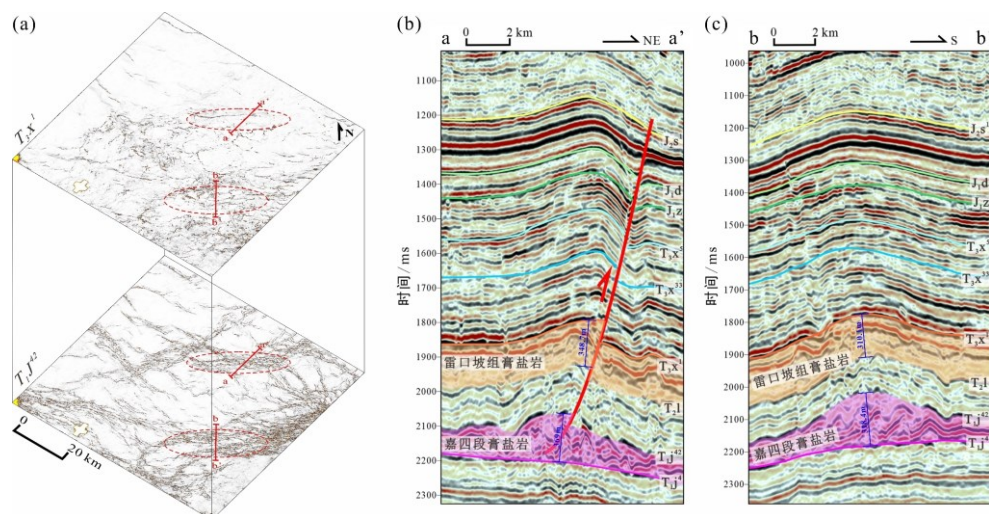


图8 褶皱主导区膏盐岩层顶面地震方差属性及典型构造样式(位置见图4A)

Fig. 8 Variance attributes of the evaporite layers and structural styles in the folding-dominated area (see locations in Fig. 4 A)

②宽缓盐背斜（图8c）：为两翼对称型褶皱，其变形程度相较前翼突破型盐背斜有所减弱，主要发育于褶皱主导区南部。下部膏盐岩在背斜核部聚集，其顶界（ T_{ij}^{42} ）地震方差属性呈片状响应（图8a）；上部膏盐岩层厚度未见明显变化，发生被动变形并发育少量调节断层，其顶界（ T_{3x}^1 ）地震方差属性呈多条带交织状响应（图8a）。

（2）断裂主导区（B区）

断裂主导区膏盐岩层厚度显著小于北部褶皱主导区，纵向呈“上厚-下薄”配置，构造变形强度西强东弱，主要发育两种典型构造样式（图9）：

①对冲型断层（图9b）：由源自膏盐岩层的盆向逆冲断层和反向逆冲断层组合形成，构造样式复杂，变形强度较高，主要发育于断裂主导区西部。两套膏盐岩层厚度保持稳定，且均有断层发育并向上传播，两套膏盐岩顶界地震方差属性均呈线状响应（图9a）。受膏盐岩层拆离作用影响，上下两套膏盐岩层中发育的断层并未贯通雷口坡组膏盐岩，垂向上呈现分段生长特征。

②单冲型断层（图9c）：为断距较小的单断面盆向逆冲断层，其下端起源于雷口坡组膏盐岩层，变形强度较对冲型断层有所减弱，主要发育于断裂主导区东部。两套膏盐岩层厚度无明显变化，下部膏盐岩顶界（ T_{ij}^{42} ）地震方差属性呈弱响应，雷口坡组膏盐岩层受单冲型断层影响，其顶界（ T_{3x}^1 ）则出现线状响应（图9a）。

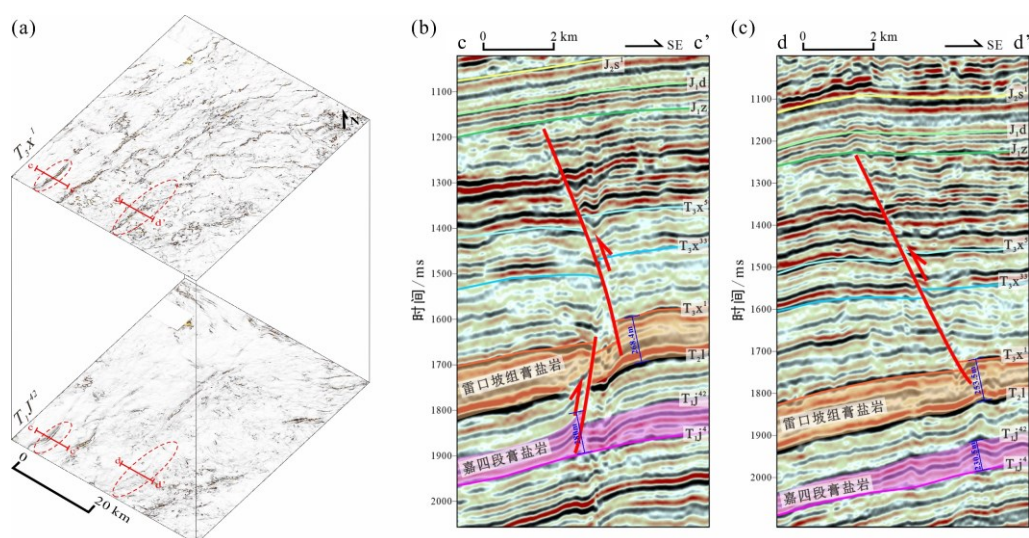


图9 断裂主导区膏盐岩层顶面地震方差属性及典型构造样式（位置见图4B）

Fig. 9 Variance attributes of the evaporite layers and structural styles in the faulting-dominated area (see locations in Fig. 4 B)

（3）弱变形区（C区）

弱变形区膏盐岩层厚度与西部断裂主导区相近，纵向呈“上厚-下薄”配置，主要发育小型调节断层（图10）。下部膏盐岩层较薄且无明显变形，其顶界（ T_{ij}^{42} ）地震方差属性无响应；上部膏盐岩层相对较厚，其盐上地层中发育少量断距较小的断层，向上仅部分切入须家河组一段，其顶界（ T_{3x}^1 ）地震方差属性出现少量近东西向线状响应。就变形强度而言，弱

变形区显著低于北部褶皱主导区和西部断裂主导区,且两套膏盐岩层对构造变形的控制作用有限。

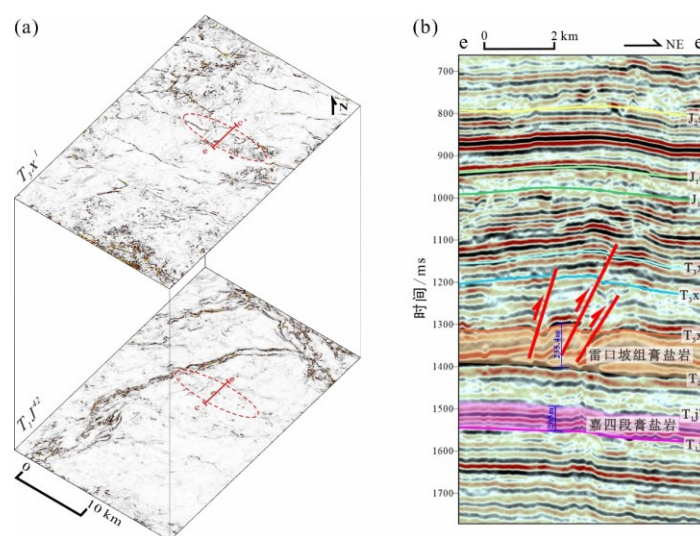


图 10 弱变形区膏盐岩层顶面地震方差属性及典型构造样式（位置见图 4 C）

Fig. 10 Variance attributes of the evaporite layers and structural styles in the weak deformation area (see location in Fig. 4 C)

4 讨论

4.1 膏盐岩层厚度对构造变形的控制作用

前人研究发现,膏盐岩层厚度是影响构造变形类型的一个关键因素。例如:在库车前陆盆地秋里塔格构造带,东秋里塔格背斜膏盐岩层较厚,盐上发育完整箱状背斜,而库车塔吾背斜膏盐岩层相对较薄,其核部被逆冲断层破坏,表明膏盐岩厚薄是决定上覆地层发育褶皱还是断裂的关键变量(赵兴等,2012);准噶尔盆地南缘发育深、中、浅三套膏盐岩层,滑脱层厚度差异显著,深部滑脱层厚度中等且分布广泛,为构造变形主控层位,中部滑脱层厚度最大但横向滑脱能力受限,浅部滑脱层最薄但横向推覆距离大,不同厚度组合的滑脱层共同控制了研究区“横向分段控带、多滑脱层垂向控层”的分区构造样式(于宝利等,2025);国外众多学者通过物理模拟和数值模拟实验进一步证实,滑脱层厚度是控制褶皱冲断带构造样式的关键因素(Cotton & Koyi, 2000; Ruh et al., 2012; Gu et al., 2021),浅部滑脱层厚度减小会导致断层发育数量增多、间距减小,而基底滑脱层厚度增加则使造山带楔体坡度变缓、变形前锋传递距离增长(龙毅等,2020)。

在前人研究基础上,本文对研究区主要发育的膏盐岩相关构造对应位置的两套膏盐岩厚度进行定量统计,并对该构造变形的主控膏盐岩层位进行区分,统计结果显示,研究区内主要发育的五种典型构造样式受到两套膏盐岩层厚度的重要控制作用:一方面,膏盐岩层厚度对构造变形类型和复杂程度具有显著影响,另一方面,研究区膏盐岩层的厚度空间展布差异是导致构造分区的一个重要控制因素。如图11所示,当两套膏盐岩层均较薄时,构造变形以

断裂变形为主（断裂主导区及弱变形区），变形程度及涉及层位较少，如小型调节断层、单冲型断层、对冲型断层；当膏盐岩层显著增厚时，则以发育更为复杂的宽缓盐背斜为主，随着变形程度的增强还可进一步发展为前翼突破型紧闭盐背斜（褶皱主导区）。

此外，两套膏盐岩层对构造变形的控制作用存在差异，当嘉陵江组四段膏盐岩层厚度小于250 m时，其滑脱能力极其有限，主要由其上部的雷口坡组膏盐岩层主导变形，随着嘉陵江组四段膏盐岩层逐步加厚，其滑脱能力也随之提升，逐步变为构造变形的主控滑脱层。在断裂主导区和弱变形区，嘉陵江组四段膏盐岩层厚度较薄，构造变形主要受控于雷口坡组膏盐岩层（图9c，图10b）；与之相比，褶皱主导区嘉陵江组四段膏盐岩层厚度明显大于断裂主导区和弱变形区，滑脱能力显著增强并接替雷口坡组膏盐岩层成为主控滑脱层（图8b、c，图9b）。

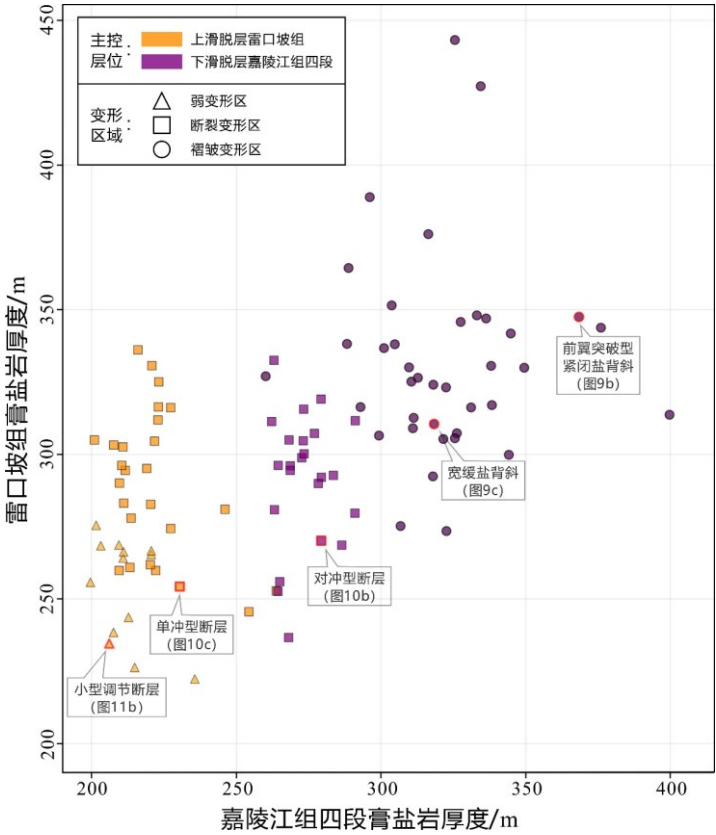


图 11 雷口坡组、嘉陵江组四段膏盐岩厚度与构造变形统计分析

Fig. 11 Statistics of evaporite thickness and structural deformation for the Leikoupo–Jialingjiang (4th member) evaporites

4.2 差异构造变形机制

综合考虑膏盐岩层空间分布与挤压应力两个影响因素，提出了“膏盐岩层厚薄-应力强弱”双因素控制下的差异构造变形机制（图12）：

（1）“厚膏盐岩-强挤压应力”变形模式：主要出现在褶皱主导区。该区发育有较厚的膏盐岩层（图6），在构造变形过程中通过嘉陵江组四段膏盐岩的塑性流动在局部发生聚集，

导致其上覆地层发生被动褶皱变形，具体体现为前翼突破型紧闭盐背斜与宽缓盐背斜两种构造样式（图8）。其中，褶皱主导区北部受到米仓山-大巴山造山带的影响较强，挤压构造变形强度较大，盐背斜紧闭程度较高且其前翼被断层突破（图12 b-S_I）；而在褶皱主导区南部，由于距离米仓山-大巴山造山带较远，挤压构造变形强度较北部显著减小，仅发育宽缓盐背斜（图12 b-S_{II}）。显然，褶皱主导区自北向南构造样式的变化反映了米仓山-大巴山造山带向盆地的挤压应力的逐步衰减。

（2）“薄膏盐岩-强挤压应力”变形模式：主要出现在断裂主导区。该区膏盐岩层厚度较薄（图6），膏盐岩的塑性流动能力有限，其上覆地层没有发生明显的褶皱变形，而是以断裂变形为主要特征。受龙门山造山带向盆地的挤压应力影响，在盆内发育了龙泉山构造（图2）并传递挤压应力，自西向东构造变形强度逐渐减弱，依次发育对冲型断层和单冲型断层（图9）。其中，在断裂主导区西部，两套膏盐岩层均参与构造变形并形成对冲型断层（图12 b-S_I），而在其东部则仅上部雷口坡组膏盐岩层参与变形而形成单冲型断层（图12 b-S_{II}）。

（3）“薄膏盐岩-弱挤压应力”变形模式：主要出现在弱变形区。该区位于川中古隆起，膏盐岩层厚度最薄（图6）且远离造山带，构造变形程度较低，仅在雷口坡组膏盐岩上覆地层中发育少量小型调节断层（图12 b-S_{III}和S_{III}）。

对比以上三种模式及其主控变形区发现：研究区自北向南受膏盐岩层变薄和米仓山-大巴山造山带向盆地的挤压应力减弱的共同影响，构造变形从“厚膏盐岩-强挤压应力”模式控制下的褶皱主导区逐步过渡为“薄膏盐岩-弱挤压应力”模式控制下的弱变形区（图12 b-S_{I-III}）；自西向东受薄膏盐岩层和龙门山造山带向盆地的挤压应力减弱的共同影响，构造变形从“薄膏盐岩-强挤压应力”模式控制下的断裂主导区逐步过渡为“薄膏盐岩-弱挤压应力”模式控制下的弱变形区（图12 b-S_{I-III}）。

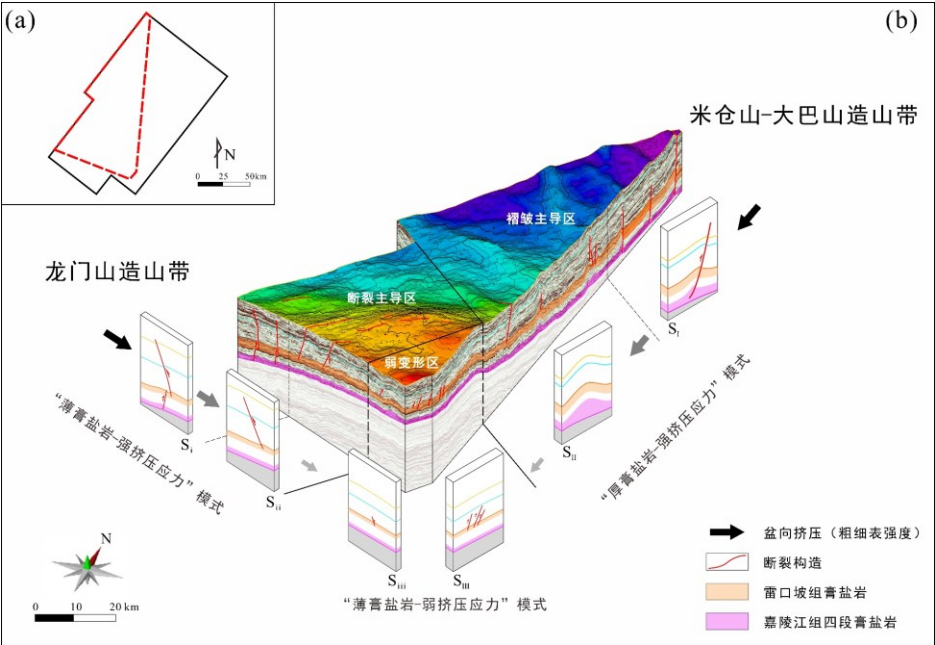


图 12 川中古隆起西北斜坡差异构造变形机制

Fig. 12 Differential structural deformation mechanisms of the northwestern slope of the Central Paleo-Uplift,
Sichuan basin

5 结论

(1) 研究区构造变形具有显著的平面差异性, 平面上可分为北部褶皱主导区、西部断裂主导区和南部弱变形区。其中, 褶皱主导区主要发育宽缓盐背斜和前翼突破型紧闭盐背斜, 断裂主导区发育对冲型断层和单冲型断层, 弱变形区则发育小型调节断层。

(2) 综合考虑膏盐岩层空间分布与造山带向盆地的挤压应力两个影响因素, 提出了“膏盐岩层厚薄-应力强弱”双因素控制下的差异构造变形机制, 建立了三种变形模式: “厚膏盐岩-强挤压应力”模式、“薄膏盐岩-强挤压应力”模式和“薄膏盐岩-弱挤压应力”模式。

(3) 自北向南受膏盐岩层变薄和米仓山-大巴山造山带向盆地的挤压应力减弱的共同影响, 构造变形从“厚膏盐岩-强挤压应力”模式控制下的褶皱主导区逐步过渡为“薄膏盐岩-弱挤压应力”模式控制下的弱变形区; 自西向东, 受薄膏盐岩层和龙门山造山带向盆地的挤压应力减弱的共同影响, 构造变形从“薄膏盐岩-强挤压应力”模式控制下的断裂主导区逐步过渡为“薄膏盐岩-弱挤压应力”模式控制下的弱变形区。

References

- Cotton J T, Koyi H A. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments: Application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 351-363.
- FENG B, PEI Y, SU N, et al. Spatial and temporal evolution of paleo-highs/lows of the permian strata and its petroleum significance in the Sichuan basin, SW China[J]. *International Geology Review*, 2023, 65(14): 2269-2287.
- Gu Z D, Wang X, Nunns A, et al. Structural styles and evolution of a thin-skinned fold-and-thrust belt with multiple detachments in the eastern Sichuan Basin, South China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 142: 104191.
- HU S, ZHAO W, HOU L, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 877-887.
- Huang H ,Lu R ,He D , et al.Intricate Fault Systems in Longmenshan Structural Belt's Northern End: Exploring Structural Evolution and Seismic Rupture Behavior in the Eastern Tibetan Plateau[J].*Journal of Earth Science*,2025,36(01):250-265.
- LEWIS M M, JACKSON C A L, GAWTHORPE R L. Salt-influenced normal fault growth and forced folding: The Stavanger Fault System, North Sea[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 54: 156-173.
- MIAO Z, PEI Y, SU N, et al. Spatial and temporal evolution of the Sinian and its implications on petroleum exploration in the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 110036.
- Ruh J B, Kaus B J P, Burg J P, et al. Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belts: Influence of rheology of single and multiple décollements[J]. *Tectonics*, 2012, 31(3): TC3005.
- STEWART S A. Influence of detachment layer thickness on style of thin-skinned shortening[J]. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18(10): 1271-1274.
- Yin Q H, Xu X, Yang X D, et al. Imaging the Western Boundary of the Sichuan Craton from Multiple Geophysical Observations[J]. *Journal of Earth Science*, 2024, 35(6): 2187-2194.

附中文参考文献

- 卞从胜, 王红军, 汪泽成, 等. 四川盆地川中地区须家河组天然气大面积成藏的主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(05): 548-555, 565.
- Bian Cong-sheng, Wang Hong-jun, Wang Ze-cheng, et al. Controlling factors for massive accumulation of naturalgas in the Xujiahe Formation in Central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 548-555, 565.
- 何登发, 王成善, 管树巍, 等. 分层滑脱: 羌塘盆地构造研究的新概念[J]. *地质科学*, 2023, 58(01): 1-17.
- HE Deng-fa, WANG Cheng-shan, GUAN Shu-wei, et al. Stratified detachment deformation: New concept for studies on the tectonics of Qiangtang Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(1): 1-17.
- 何治亮, 聂海宽, 蒋廷学. 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(02): 1-11.

- HE Zhi-liang, NIE Hai-kuan, JIANG Ting-xue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gasin Sichuan Basin[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(2): 1-11.
- 侯筱晓, 能源, 漆家福, 等. 天山南北前陆冲断带构造滑脱层分布差异及对圈闭样式的控制作用[J]. *现代地质*, 2021, 35(06): 1818-1829.
- HOU Xiao-xiao, NENG Yuan, QI Jia-fu, et al. Structural detachmentlayer distribution variation and trap controls along foreland thrustbelts in northern and southern Tianshan[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6):1818-1829.
- 龙毅, 陈汉林, 程晓敢, 等. 浅部滑脱层沿走向的厚度与性质差异对变形影响的物理模拟研究: 对乌什和库车褶皱冲断带的启示[J]. *地质学报*, 2020, 94(06): 1773-1784.
- Long Y, Chen H L, Cheng X G, et al. Physical simulation of the influence of thickness and property variation of shallow detachment layers along strike on deformation: Implications for the Wushi and Kuqa fold-thrust belts[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(6): 1773-1784.
- 李洪奎, 李忠权, 龙伟, 等. 四川盆地纵向结构及原型盆地叠合特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(3): 257-267.
- LI Hong-kui, LI Zhong-quan, LONG Wei, et al. Vertical configuration of Sichuan Basin and its superimposed characteristics of the prototype basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2019, 46(3): 257-267.
- 李智武. 中—新生代大巴山前陆盆地—冲断带的形成演化[D]. 成都理工大学, 2006.
- LI Zhi-wu. Meso-Cenozoic Evolution of Dabashan Foreland Basin-Thrust Belt, central China[D]. *Chengdu: Chengdu University of Technology*, 2006.
- 栗兵帅, 颜茂都, 张伟林. 柴北缘早新生代旋转变形特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2022, 29(04): 249-264.
- LI Bing-shuai, YAN Mao-du, ZHANG Wei-lin. Early Cenozoic feature in the northern Qaidam marginal thrust belt and its tectonic implications[J]. *Earth Science frontiers*, 2022, 29(4): 249-264.
- 梁瀚, 文龙, 冉峥, 等. 四川盆地龙门山前北段构造演化特征及其油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(03): 478-490.
- LIANG Han, WEN Long, RAN Qi, et al. Structural characteristics and implications on oil/gas accumulation in north segment ofthe Longmenshan piedmont, northwestern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 478-490.
- 刘树根, 李智武, 孙玮, 等. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. *地质科学*, 2011, 46(01): 233-257.
- LIU Shu-gen, LI Zhi-wu, SUN Wei, et al. The basic characteristics of theoverlapping petroleum-bearing basins in Sichuan[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 46(1): 233-257.
- 梅庆华, 何登发, 文竹, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地质结构及构造演化[J]. *石油学报*, 2014, 35(01): 11-25.
- MEI Qing-hua, HE Deng-fa, WEN Zhu, et al. Geologic structure and tectonic evolution of Leshan-Longnvsi paleo-uplift in Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 11-25.
- 裴仰文, 盛受政, 苗正硕, 等. 多滑脱层构造物理模拟试验及其对川东褶皱带形成演化的指示意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(02): 38-49.

- PEI Yang-wen, SHENG Shou-zheng, MIAO Zheng-shuo, et al. Sandbox physical modelling with multiple detachment layers and its implication on structural evolution of East Sichuan Fold Belt[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2022, 46(2): 38-49.
- 屈梦雪, 程晓敢, 田禾丰, 等. 双滑脱层强度对博格达山北缘构造变形的影响: 基于离散元数值模拟[J]. *地球科学*, 2023, 48(04): 1366-1378.
- QU Meng-xue, CHENG Xiao-gan, TIAN He-feng et al. Effect of Double-Décollement Strength on Structure Deformation in Northern Bogda Mountain Using Discrete Element Numerical Simulation[J]. *Earth Science*, 2023, 48(4): 1366-1378.
- 任纪舜, 肖黎薇. 1:25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱[J]. *地质通报*, 2004(01): 1-11.
- REN Ji-shun, XIAO Li-wei. Lifting the mysterious veil of the tectonics of the Qinghai-Tibet Plateau by 1:250000 geo-logical mapping[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(1):1-11
- 唐鹏程, 饶刚, 李世琴, 等. 库车褶皱-冲断带前缘盐层厚度对滑脱褶皱构造特征及演化的影响[J]. *地学前缘*, 2015, 22(01): 312-327.
- Tang Peng-cheng, Rao Gang, Li Shi-qin et al. The impact of salt layer thickness on the structural characteristics and evolution of detachment folds in the leading edge of Kuqa fold and thrust belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015 22(1): 312-327.
- 汪泽成, 李宗银, 李志荣, 等. 川中地区须家河组构造变形成因探讨及其勘探意义[J]. *天然气工业*, 2012, 32(04): 13-18.
- Wang Ze-cheng, Li Zong-yin, Li Zhi-rong, et al. Genesis of structural deformation of the Xujiahe Formation in the central Sichuan Basin and its significance to petroleum exploration[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(4): 13-18.
- 魏峰, 陈孔全, 庾秀松. 川东齐岳山断层北部差异构造变形特征[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(03): 348-354.
- WEI Feng, CHEN Kong-quan, TUO Xiu-song, et al. Differential tectonic deformation in the northern Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 348-354.
- 魏国齐, 贾东, 杨威, 等. 四川盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 205-213.
- 谢会文, 能源, 敬兵, 等. 库车坳陷盐下构造变形特征及其控制因素[J]. *地质科学*, 2012, 47(03): 693-706.
- Xie H W, Neng Y, Jing B, et al. Deformation characteristics and controlling factors of subsalt structures in the Kuqa Depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(3): 693-706.
- 殷积峰, 谷志东, 李秋芬. 四川盆地大川中地区深层断裂发育特征及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(03): 376-382.
- YIN Ji-feng, GU Zhi-dong, LI Qiu-fen. Characteristics of deep-rooted faults and their geological significances in Dachuanzhong area, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 376-382.
- 于宝利, 贾承造, 刘可禹, 等. 准噶尔盆地南缘多滑脱层控制的冲断构造特征及深层油气勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(03): 593-606.

YU Bao-li, JIA Cheng-zao, LIU Ke-yu, et al. Multi-detachment-controlled thrust structures and deep hydrocarbon exploration targets in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(3): 593-606.

于佳男, 李忠权, 曾庆, 等. 龙泉山构造带构造特征及扭动形迹成因探讨[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(03): 1-3, 7.

YU Jia-nan, LI Zhong-quan, ZENG Qing, et al. Structural Characteristics and Origin of Twisted in Longquanshan Tectonic Belt[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2013, 36(3):1-3, 7.

张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(10): 1553-1582.

ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, WANG Yue-jun, et al. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56:1804-1828.

赵兴, 贾承造, 李本亮, 等. 库车冲断带秋里塔格构造带东段构造样式与构造演化[J]. 地质科学, 2012, 47(03): 708-720.

Zhao X, Jia C Z, Li B L, et al. Structural style and evolution of the eastern Qiulitage structural belt in the Kuqa thrust belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(3): 708-720.