

川南大安地区二叠系-三叠系海相碳酸盐岩断裂构造变形与缝洞型气藏特征

罗瑀峰¹, 黄涵宇², 舒红林¹, 熊加贝¹, 王高成¹, 栗维民¹, 芮 昀¹, 马欢朋²

(1. 中国石油 浙江油田公司, 浙江 杭州 311100; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:为明确川南大安地区二叠系-三叠系海相碳酸盐岩层内Ⅲ级逆断层的构造特征及其对缝洞型气藏的控制作用和断控气藏分布规律,基于井-震联合标定、平面-剖面结合精细构造解析、三维构造-断层建模和钻井油气显示综合分析,系统研究了断裂体系构造变形特征及其控储、控藏作用。研究结果表明:①Ⅲ级逆断层倾角主要为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,倾滑位移可达400~550 m,属于区域挤压作用下形成的层内局部调节断层;②Ⅲ级逆断层平面延伸普遍小于6 km,但部分可达20 km以上,累计长度超530 km,单侧碳酸盐岩破碎带面积为360~600 km²;③二叠系-三叠系海相碳酸盐层内构造裂缝系统走向与Ⅲ级逆断层基本一致,构成断控缝洞型储集体,气藏分布明显受断裂带控制。大安地区二叠系-三叠系海相碳酸盐岩Ⅲ级逆断层是控制缝洞型气藏形成的关键地质要素,断裂带控制的缝洞型储层具有良好的勘探潜力,但需要从技术上解决储层非均质性表征、三维地质建模和甜点预测等难题。

关键词:三维构造建模;断控缝洞型储层;构造变形;断裂体系;海相碳酸盐岩;二叠系-三叠系;大安地区;四川盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Fault-related deformations and fractured-vuggy gas reservoirs in the Permian-Triassic marine carbonate strata in the Da'an area, southern Sichuan Basin

LUO Yufeng¹, HUANG Hanyu², SHU Honglin¹, XIONG Jiabei¹, WANG Gaocheng¹, LI Weimin¹,
RUI Yun¹, Ma Huanpeng²

(1. Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 311100, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: This study aims to elucidate the structural characteristics of third-order reverse faults within the Permian-Triassic marine carbonate strata in the Da'an area, southern Sichuan Basin and to explore both the controlling effects of these faults on fractured-vuggy gas reservoirs and the distribution pattern of fault-controlled gas reservoirs. By integrating well-to-seismic calibration, plan-section combined fine-scale structural interpretation, 3D structure-fault modeling, and comprehensive analyses of drilling-related oil and gas shows, we systematically investigate the characteristics of the deformation structures associated with the third-order reverse fault system and its control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation. The results indicate that the third-order reverse faults in the Da'an area generally exhibit dip angles ranging from 10° to 20° and dip-slip displacements reaching up to 400 ~ 550 m, representing intralayer local adjustment faults formed under regional compression. These third-order reverse faults largely show lateral extensions of less than 6 km, while some extend for up to more than 20 km, resulting in a cumulative length exceeding 530 km. Carbonate fracture zones on their hanging walls or footwalls cover areas ranging from 360 km² to 600 km². The tectonic fracture systems within the Permian-Triassic marine carbonate strata have strikes roughly consistent with those of the third-order reverse faults. They form fault-controlled fractured-vuggy reservoirs, with the distribution of gas reservoirs significantly governed by fault zones. Overall, the third-order reverse faults in the Permian-Triassic marine carbonate strata in the

收稿日期:2025-03-27;修回日期:2025-11-17。

第一作者简介:罗瑀峰(1992—),男,高级工程师,油气勘探与开发。E-mail: luoyufeng85@petrochina.com.cn。

通信作者简介:黄涵宇(1993—),男,博士、研究员,含油气盆地构造分析、沉积地质学。E-mail: huanghanyu313@163.com。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42330810, U24B6001)。

Da'an area represent a key geological factor in controlling the formation of fractured-vuggy gas reservoirs. The fault-controlled fractured-vuggy reservoirs hold great exploration potential. Nevertheless, tapping this potential requires technical breakthroughs in reservoir heterogeneity characterization, 3D geological modeling, and sweet spot prediction.

Key words: 3D structural modeling, fault-controlled fractured-vuggy reservoirs, structural deformation, fracture system, marine carbonate rocks, Permian-Triassic, Da'an area, Sichuan Basin

引用格式: 罗瑀峰, 黄涵宇, 舒红林, 等. 川南大安地区二叠系-三叠系海相碳酸盐岩断裂构造变形与缝洞型气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 505-521. DOI: 10. 11743/ogg20260210.

LUO Yufeng, HUANG Hanyu, SHU Honglin, et al. Fault-related deformations and fractured-vuggy gas reservoirs in the Permian-Triassic marine carbonate strata in the Da'an area, southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 505-521. DOI: 10. 11743/ogg20260210.

随着全球能源需求持续增长, 油气勘探开发逐渐向更深、更复杂和更隐蔽的领域拓展。近十年来, 塔里木盆地克拉通内走滑断裂系统的油气地质研究取得突破性进展, 盆地内沿走滑断裂带相继发现了富满油田、顺北油田等亿吨级至十亿吨级的大型-特大型油气田^[1-11], 揭示了超深层碳酸盐岩层系断控缝洞型油气藏(断溶体油气藏)的重要商业价值^[12-20], 为碳酸盐岩层系勘探开辟了新领域。

四川盆地发育多套海相碳酸盐岩有利勘探层, 包括震旦系灯影组, 寒武系龙王庙组和洗象池组, 二叠系栖霞组、茅口组和长兴组, 以及三叠系飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组等^[21-27]。在漫长的地质演化过程中, 这些层系受到深层走滑断裂和深-中-浅多重滑脱冲断褶皱构造的强烈改造^[28-33], 为四川盆地中部和南部断控缝洞型油气藏的形成奠定了基础。近年来, 在四川盆地南部的泸州-云锦探区和大安地区, 以二叠系-三叠系海相碳酸盐岩(中组合)缝洞型储层为目标钻探的云锦2井、大坝1井和大坝2井等在茅口组获得规模油气发现^[22, 34], 证实川南二叠系碳酸盐岩层系具有可观的断控缝洞型油气藏勘探潜力, 为该区油气勘探开发指明了方向。

尽管国内外断控缝洞型油气藏研究在断裂系统解析^[35-38]、断层核-带结构理论研究^[39-45]、断控缝洞型油气藏地球物理表征与三维雕刻^[46-50]和断控缝洞型油气藏理论研究与高效开发^[51-55]等方面已取得重要进展, 但由于不同地区构造背景、断裂变形机制和原岩遭受裂缝和岩溶叠加改造程度等方面的差异, 断控缝洞型油气藏的形成与分布具有显著的区域性特点。四川盆地南部大安地区的断控缝洞型油气藏形成于逆断层背景, 该区发育多重滑脱的冲断褶皱系统和零散分布的小尺度早期走滑断裂^[56-62], 断裂系统结构相对复杂。以往研究主要关注大尺度Ⅰ级和Ⅱ级逆断层及其成因机制^[56-62], 而对中组合发育的Ⅲ级层内滑脱逆断层的变形特征、三维结构和控储

作用缺乏系统研究。

本研究基于大安地区高精度三维地震和钻井资料, 聚焦中组合目标层系, 开展Ⅲ级逆断层三维精细解析与建模, 明确其平面分布规律、剖面构造变形特征和三维结构。通过井-震标定与钻、测井数据融合分析, 系统揭示断控缝洞型储层的发育机理和空间展布规律, 剖析典型探井的油气成藏模式。研究成果将为川南地区断控缝洞型油气藏的规模勘探与高效开发提供理论支撑。

1 区域地质背景

1.1 构造背景

四川盆地构造-沉积演化始于新元古代早期陆内裂谷发育阶段, 晚期过渡为裂后拗陷体制。从新元古代末—中三叠世, 盆地历经多期伸展—聚敛构造旋回, 表现为克拉通内拗陷与古隆起剥蚀隆升的交替演化。这一过程导致部分古生界和中生界层系缺失, 并形成了乐山-龙女寺(古生代)、泸州-开江(印支期)和威远(燕山期—喜马拉雅期)等一系列古隆起构造, 控制了盆地不同时期沉积充填序列的空间分布^[63-68]。

自晚三叠世以来, 盆地周缘的龙门山构造带、米仓山-大巴山构造带、江南-雪峰构造带和大凉山-大娄山构造带经历了多期次向盆内挤压推覆, 最终导致海相沉积体系消亡, 并形成现今的盆-山耦合体系^[68-69]。这一构造演化过程在四川盆地内形成了川西拗陷带、川北褶皱冲断构造带、川东隔挡式高陡褶皱冲断带、川南帚状低缓褶皱冲断带和川中平缓构造带等5个一级构造单元(图1a, b)。构造位置上, 大安地区位于川南帚状冲断构造带, 发育NNE向、近NS向和近WE向断背斜-向斜构造系统。背斜带呈紧密梳状排列, 向斜带表现为宽缓槽状形态, 多走向构造具有横向衔接、垂向叠加的带状组合特征。该构造系统定型于中-晚白

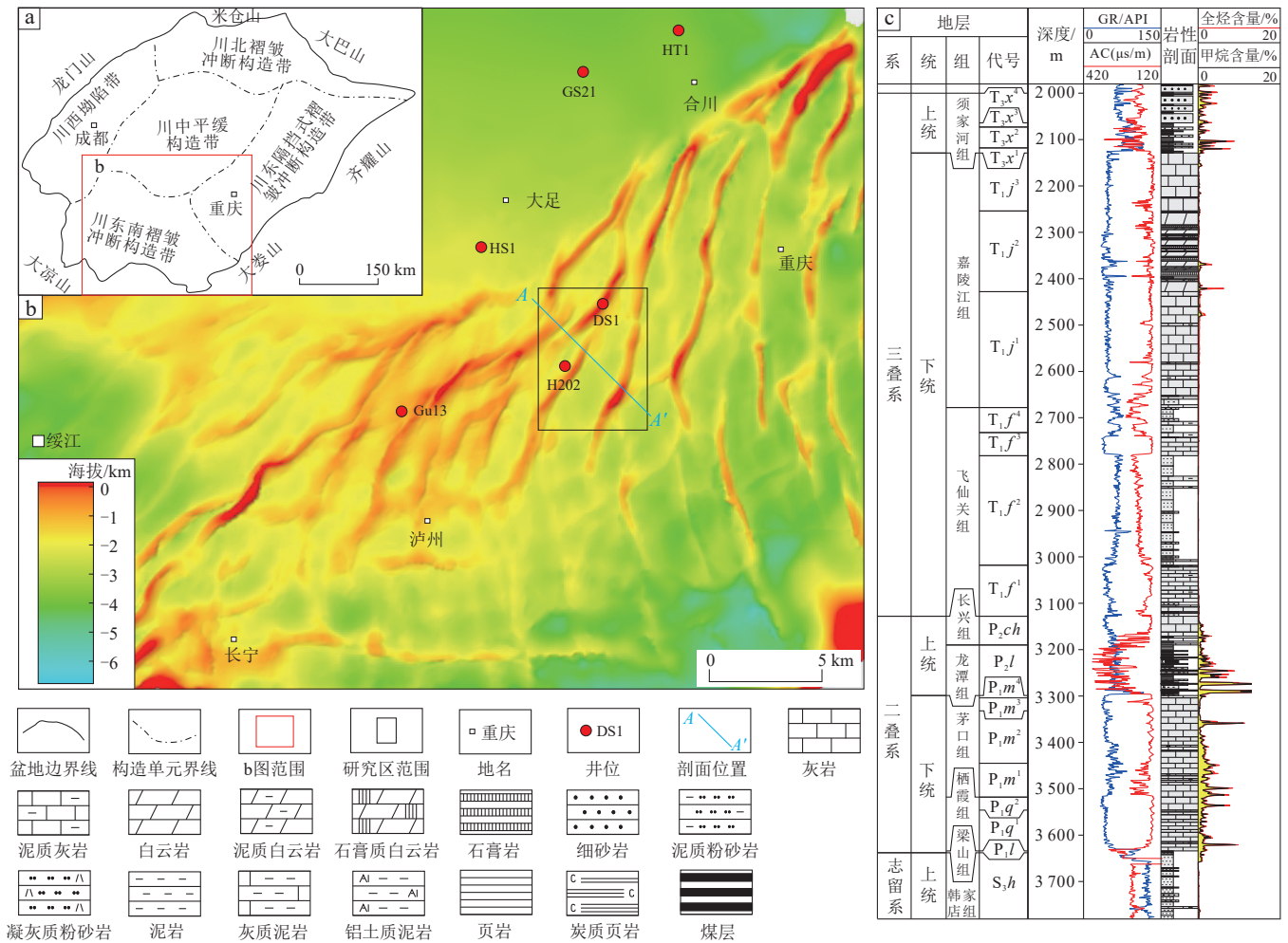


图1 四川盆地构造单元划分(a)、川南地区茅口组顶面构造图及研究区位置(b)和典型井二叠系-三叠系综合柱状图(c)

Fig. 1 Map showing the structural unit division of the Sichuan Basin (a), top surface structural map of Maokou Formation in southern Sichuan Basin and location of the study area (b), and composite stratigraphic column of the Permian-Triassic strata in a representative well in the Sichuan Basin (c)

至世至新生代,此阶段江南-雪峰造山带侧向的挤出效应引发了区域强挤压构造事件,沿中寒武统膏岩、志留系页岩、二叠系煤系和中三叠统膏岩等多套滑脱层系,发育了垂向叠置、横向穿插的多重滑脱冲断体系。

大安地区内 NWW-SEE 向的区域地震测线揭示,该区多重滑脱冲断褶皱系统由发育于不同层系的 3 级逆冲断层和成排成带的背斜、向斜构成(图 2)。剖面 A—A' 显示,自西向东发育有西山背斜、新店子背斜、板桥向斜、东山背斜、来苏向斜、黄瓜山背斜、临江向斜、六合场背斜和广普向斜等构造单元。

主体构造由深至浅发育 I 级逆冲断层,以中寒武统高台组膏岩为滑脱层,呈“上陡下缓”形态,控制新店子、东山和黄瓜山等大型背斜带。II 级逆断层控制形成次级断背斜,同样以高台组为滑脱层(图 2)。I 级和 II 级逆断层是大安地区宏观构造变形的主控构造。

III 级逆断层在不同深度构造层内均有发育。其

中,下组合 III 级逆断层发育在中寒武统一志留系底部,以中寒武统高台组膏岩为滑脱层;中组合 III 级逆断层发育在二叠系(或志留系顶部)一下三叠统飞仙关组,向下突破龙潭组含煤岩系(厚度约为 120 m),终止于二叠系底部或志留系顶部,属于典型的层内滑脱逆断层,是本研究的重点对象;上组合 III 级逆断层以嘉陵江组膏岩软弱层为滑脱层,分布有限,仅在西山背斜附近可见(图 2)。大安地区多尺度逆冲断层的密集发育构建了复杂的断裂网络,为断控缝洞型油气藏的形成提供了优越的储集空间与运移通道。

1.2 地层特征

四川盆地经历多期、多阶段、多体制构造叠加改造,泥盆系、石炭系、三叠系、白垩系和新生界等地层均遭受强烈剥蚀,其中泥盆系和石炭系等部分层系在盆地内部已无地层残余。此外,震旦系灯影组和寒武系、奥陶系、

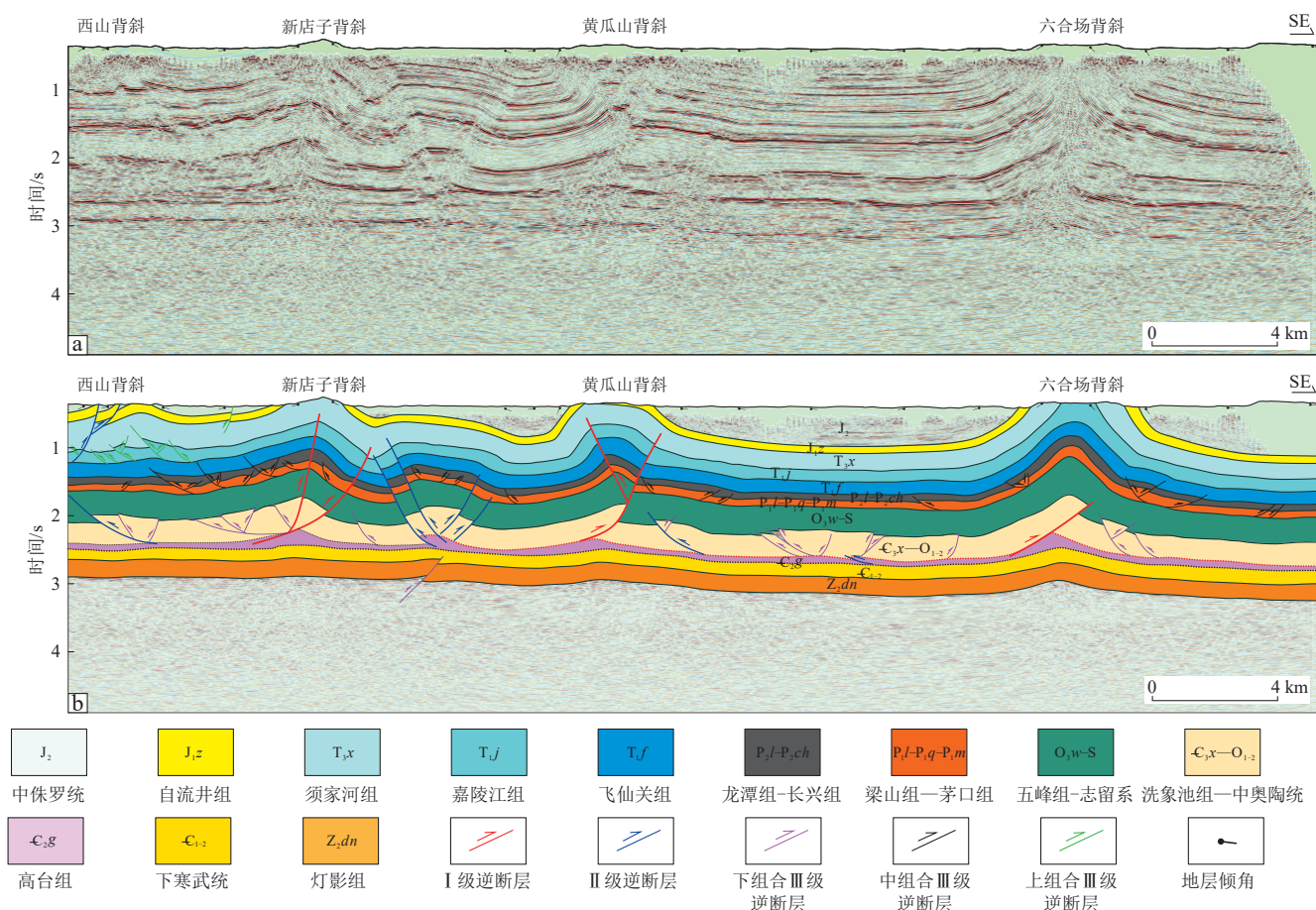


图2 大安地区NW-SE向典型剖面构造特征(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Representative NW-SE-oriented seismic profiles showing the structural characteristics of the Da'an area (see Fig. 1b for the profile location)

a. 地震反射剖面; b. 解释剖面

志留系在川中地区也因古隆起隆升而遭受强烈剥蚀。

四川盆地震旦系—中三叠统为海相沉积,以碳酸盐岩为主,夹有多套泥岩、页岩、煤岩和少量砂岩和粉砂岩。其中,下寒武统筇竹寺组发育厚层泥页岩,是盆地重要的烃源岩。中寒武统高台组发育厚层膏盐岩,为川南地区寒武系—志留系逆冲断层重要的滑脱层。上寒武统—奥陶系发育多套碳酸盐岩与海相碎屑岩互层。志留系则发育泥页岩,在川南地区厚度可达上千米,其上部遭受大量剥蚀,与二叠系底部不整合接触,是大安地区中组合最重要的烃源岩。二叠系—下三叠统在四川盆地内地层发育齐全,自下而上依次发育二叠系栖霞组、茅口组、龙潭组和长兴组以及下三叠统飞仙关组和嘉陵江组。其中,上二叠统龙潭组发育的煤系地层也是大安地区中组合重要的烃源岩(图1c)。在大安地区,中三叠统雷口坡组在泸州古隆起发育时期被剥蚀殆尽,上三叠统须家河组以角度不整合覆盖在下三叠统嘉陵江组之上(图1c)。四川盆地上三叠

统及以上地层为陆相沉积层序,以砂岩和泥岩为主,侏罗系与上三叠统须家河组不整合接触,第四系同样与下伏侏罗系不整合接触。

2 基础数据与方法

本研究使用的基础数据为川南大安地区高精度三维叠前时间偏移地震数据和钻井数据。地震数据的采集面元为20 m × 20 m,面积约1 220 km²。基于Petrel软件平台,利用DX1井和DX2井的声波和密度测井数据,对中组合二叠系和三叠系的关键地层界面开展了井-震标定。在此基础上,开展层面自动追踪,同时通过人工手动追踪对层位细节进行调整。

研究拾取中组合梁山组(P₂l)底界、龙潭组(P₂l)底界和嘉陵江组(T₂j)底界的高精度层面数据,并以20 m × 20 m为网格制成高精度层面模型。大安地区二叠系—三叠系地震反射关键界面清晰、连续性好(图3a),因此层

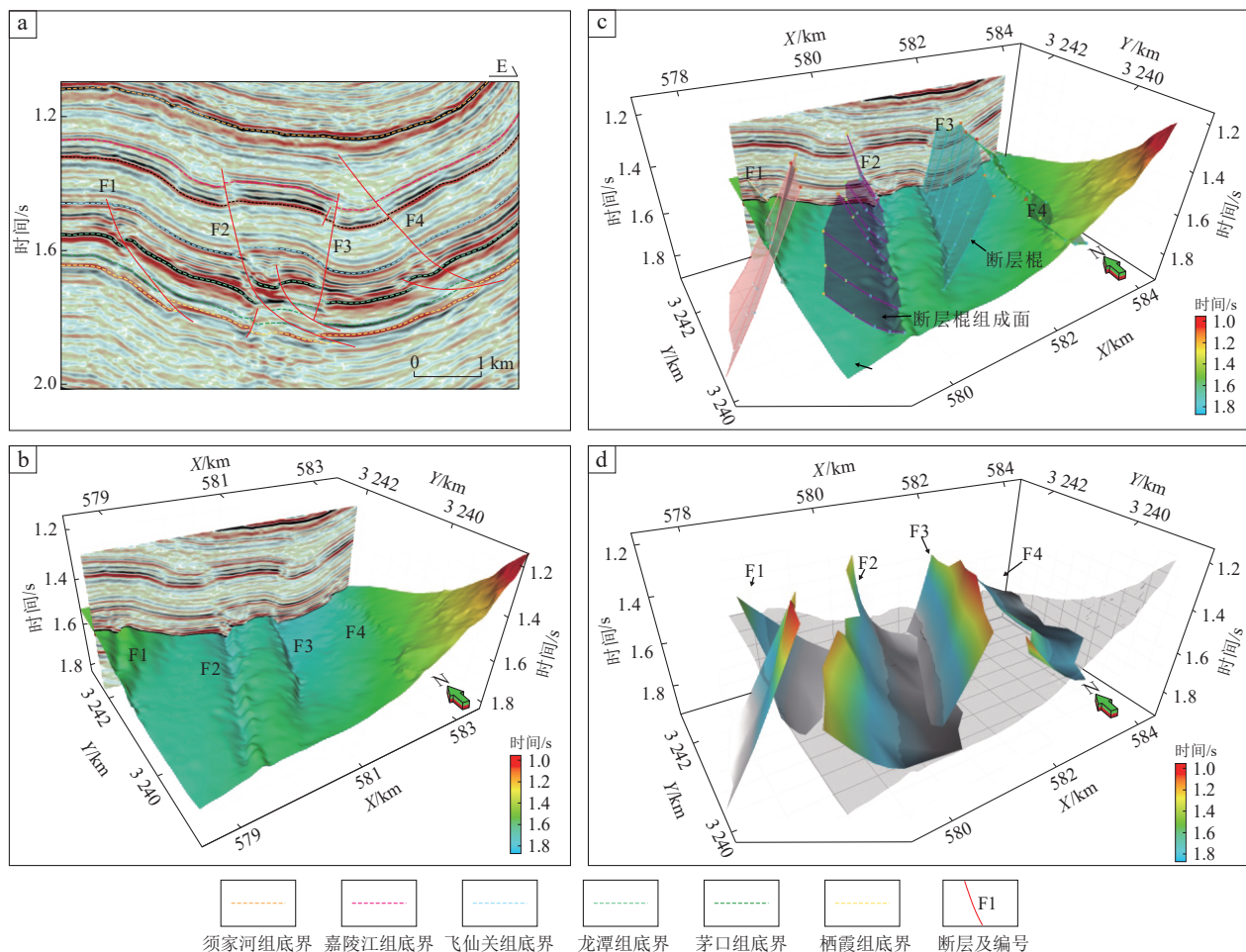


图3 大安地区二叠系-三叠系碳酸盐岩断层三维构造模型的构建思路与方法

Fig. 3 Philosophy and methodology for 3D structural modeling of faults within the Permian-Triassic carbonate strata in the Da'an area

a. 剖面构造特征; b. 三维层面模型; c. 三维层面+断面模型; d. 三维构造模型

(X为南北方向大地坐标轴; Y为东西方向大地坐标轴; F1—F4为示例断层。)

面自动拾取和高精度网格层面建模获得的断层特征和褶皱形态等往往可以突破人工层位解释和 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 大网格层面构造图的精度。同时,相较于二维层面地震属性(如相干属性、曲率属性等)平面断层特征,高精度三维层面模型提供了更直观的断层观测视角(图3b),这对于识别、解释和组合断层(图3c),以及构建三维断层模型具有显著的可视化优势。

因此,本研究基于高精度层面模型,首先开展平面与剖面相结合的断层解释和组合,厘定二叠系-三叠系断层平面组合规律和剖面变形特征(图3a)。随后开展断层面三维解释和组合,以每10道或20道(200 m或400 m)为间距切近垂直断层走向的地震剖面,逐个对剖面进行断层解释,通过多个断层解释控制点形成断层棍,再由断层棍组合构建完整的三维断层面(图3c)。最后在三维空间中进行质控断层组合,最终构建中组合断层三维构造模型(图3d)。

基于上述断层构造解释和组合方法,获得大安地区中组合断层的平面分布规律、剖面构造变形样式和三维构造模型,然后开展该区断层面产状分析、延伸长度统计、断层断距测量和断层面面积估算,以进一步明确大安地区中组合Ⅲ级逆断层构造变形特征。

3 中组合Ⅲ级逆断层构造变形特征

大安地区Ⅲ级逆断层系统对二叠系-三叠系碳酸盐岩地层的构造改造作用显著促进了碳酸盐岩层缝洞型储层的发育,使其成为该区带油气勘探研究的重点目标。对于该断裂系统垂向分层特征、平面展布规律和三维空间结构等关键参数(包括断距规模、断面几何产状和空间配置关系)的系统解析,不仅是揭示区域构造变形特征的基础,更是阐明断裂控储效应和油气资源潜力的关键地质依据。

3.1 断层剖面构造变形特征

垂直于中组合Ⅲ级逆断层走向的地震剖面解析(图4)揭示,该断裂系统主要起始于志留系顶部或二叠系底部,垂向断穿飞仙关组底界,局部延伸至飞仙关组和嘉陵江组内部。断层倾角基本呈现出“上陡下缓”特征(图4):上部倾角多为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (最高达 72° ,如F3断层);中部倾角多为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$;下部倾角多为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ (最低至 3° ,如断层F20)(图4b,图5a)。

在剖面中,断层与相关褶皱组合形成多种构造样式:①单一逆断层及相关褶皱的断背斜组合(图4b, f, g);②两条及以上同倾向的断层侧向斜列形成的叠瓦冲断构造组合(图4h);③单一主断层与其前端次级破裂构成的树枝状逆断层及断背斜构造组合(图4a);④逆断层与上升盘反向逆断层上下叠置形成的“y”字形或“反y”字形冲断褶皱构造组合(图4c—e);⑤倾向相反的逆断层相向逆冲形成的对冲构造组合(图4c)。

逆断层的倾滑位移量(dip slip displacement)是衡量断层运动学特征的关键参数。倾滑位移量统计表明(图5b),中组合Ⅲ级逆断层对二叠系梁山组、茅口组、龙潭组和长兴组改造最为显著。茅口组底界位移量最大(F1, F10, F20和F23均达 $400 \sim 550$ m),二叠系底界次之($350 \sim 430$ m)。位移量垂向分布呈现茅口组>二叠系底界>志留系顶部的递减趋势,向上至龙潭组、长兴组和飞仙关组逐渐趋于0。这表明断裂活动受控于志留系顶部滑脱层的应力传递效率差异。

在区域构造挤压作用下,新店子、黄瓜山和六合场背斜通过褶皱缩短吸收了主要的区域挤压应变,而中组合Ⅲ级逆断层系统作为层内调节构造,主要承担剩余的地层缩短量及层间差异应力调节。

3.2 断层平面分布特征

基于高精度三维层面模型中断层陡坎的几何形态与空间展布规律(图6a, b),结合地震剖面断层解释结果,系统厘定了中组合Ⅲ级逆断层体系在关键地层界面的平面分布特征。

二叠系底界、茅口组底界和龙潭组底界构成断层优势发育层位,其平面分布具有高度一致性。统计识别显示,错断上述地层界面的断层保守统计达112余条,走向主要为NNE向($N10^{\circ}E \sim N20^{\circ}E$),其中60%倾向SEE向,40%倾向NWW向(图6c)。以龙潭组底界为例,在三维层面模型中,断层陡坎呈线性展布,与未变形地层面形成明显差异。

经测量,断层延伸长度集中在6 km以下(图6d)。尽管Ⅲ级逆断层的断距和断层规模等与Ⅰ级和Ⅱ级逆断层存在巨大差异(图2),但这些断层的平面延伸长度也可达 $10 \sim 20$ km,部分断层的长度甚至可以超过20 km(图6d)。如剖面4揭示的断层F10(图4d),其从D6井区向南延伸至D7井区附近,总长约30 km(图6a)。相较于深部层位,嘉陵江组底界断层密度降低,断层对嘉陵江组底界错断改造后形成的断层陡坎显著程度也不及龙潭组底界,但断层走向与倾向仍继承深部构造格局(图6b)。空间分析表明,Ⅲ级逆断层主要集中分布于向斜构造区,与NE向背斜带呈近平行或渐变终止关系,基本没有断层直接错断背斜带(图6a, b)。这种分布模式表明,Ⅲ级断层主要承担向斜核部褶皱应变。

3.3 断层三维构造特征与破碎带规模

基于三维构造建模结果(图7),中组合Ⅲ级逆断层系统呈现以下特征:①断层主体呈 $N10^{\circ}E \sim N20^{\circ}E$ 走向,平面展布呈丝缕状;②断面倾角具有垂向梯度变化特征,符合滑脱层控制的分层剪切模式;③断层间以同向斜列或对冲构造为主,交叉切割现象罕见,反映区域挤压应力场的相对均匀性;④相较于发育在寒武系至三叠系内的Ⅰ级逆断层,中组合Ⅲ级逆断层的断层面尺度相对较小,部分细碎,少数延伸较长、规模较大;⑤中组合发育110余条Ⅲ级逆断层,总长度保守估计约530 km;⑥在断层面平均宽 $1.5 \sim 2.0$ km条件下,中组合Ⅲ级逆断层的破裂面总面积约 $800 \sim 1\,000$ km²。

断层错断的碳酸盐岩层系主要为二叠系栖霞组、茅口组和长兴组,在上述碳酸盐岩地层累计垂厚(H)约为250 m(图1c)、断层在这些层系的倾角(α)约 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ (图5a)的情况下,中组合Ⅲ级逆断层的累计延伸长度(L)约为530 km,断层单侧碳酸盐岩的累计破碎带面积可用如下公式估算:

$$S = \frac{HL}{\tan \alpha} \quad (1)$$

式中: S 为断层破碎带面积, m²; L 为逆断层的累计延伸长度, m; H 为碳酸盐累计垂直厚度, m; α 为断层倾角, ($^{\circ}$)。

计算显示,断层上盘一侧或下盘一侧的单侧碳酸盐岩断层破碎带面积可达 $360 \sim 600$ km²。相较于寒武系—三叠系Ⅰ级逆断层,Ⅲ级断层规模较小,但其高密度分布特征导致破碎带连片发育,形成了区域性缝洞储层网络,这为深层油气运移和聚集提供了优势空间。

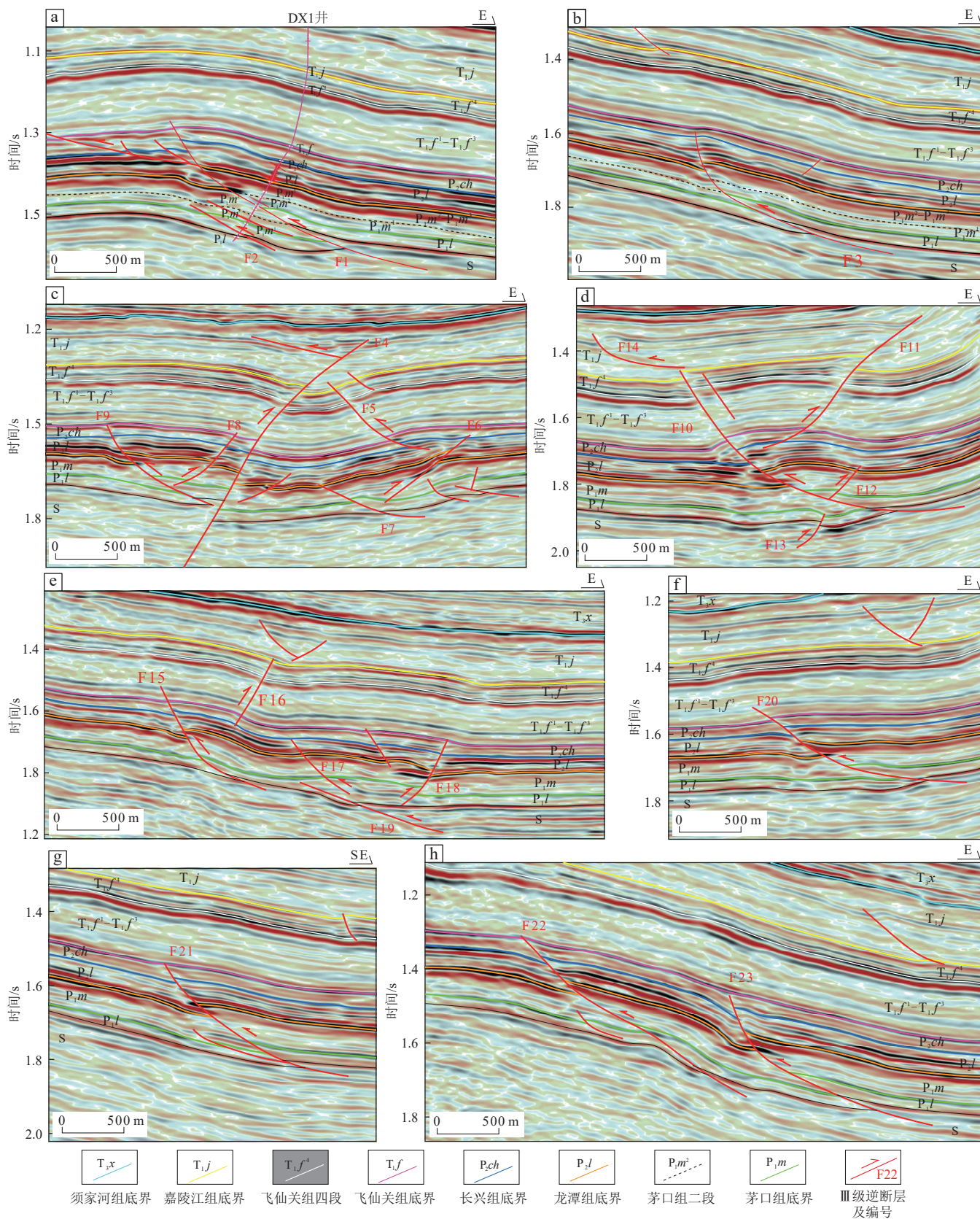
图4 大安地区二叠系-三叠系碳酸盐岩断裂构造变形特征剖面(剖面位置见图6a₁)

Fig. 4 Characteristics of deformation structures related to faults within the Permian-Triassic carbonate rocks in the Da'an area (see Fig. 6a₁ for the section location)

a. 剖面1; b. 剖面2; c. 剖面3; d. 剖面4; e. 剖面5; f. 剖面6; g. 剖面7; h. 剖面8
(F1—F23为Ⅲ级逆断层。)

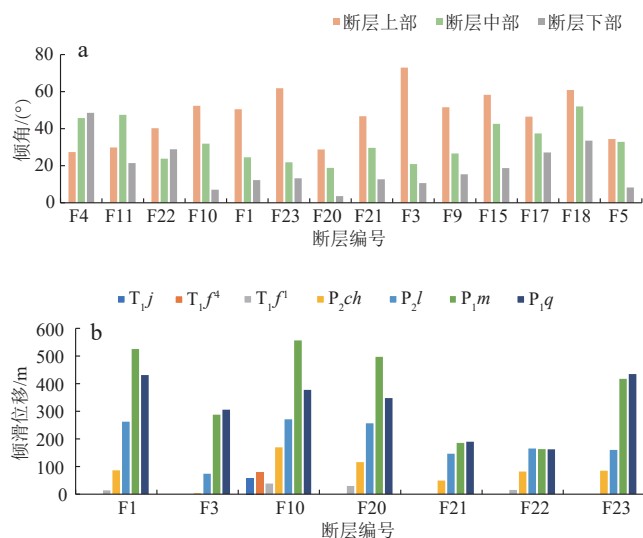


图5 大安地区二叠系-三叠系碳酸盐岩典型Ⅲ级逆断层倾角(a)和倾滑位移(b)统计柱状图

Fig. 5 Histogram showing the dip angles and dip-slip displacements of typical third-order reverse faults within the Permian-Triassic carbonate strata in the Da'an area

T_{1j} : 嘉陵江组; T_{1f4} : 飞仙关组四段; T_{1f1} : 飞仙关组一段; P_{2ch} : 长兴组; P_{2l} : 龙潭组; P_{1m} : 茅口组; P_{1q} : 栖霞组

4 二叠系-三叠系断控缝洞型气藏特征

大安地区钻探成果揭示,中组合Ⅲ级逆断层系统控制的断溶体气藏具有显著分层富集特征^[22, 34]。本研究选取东山背斜南倾伏端DX2井和DX1井开展典型案例解析,阐明断层-储层耦合机制。

4.1 DX2井区断控缝洞型气藏特征

DX2井在进入飞仙关组四段后开始造斜,此后以大斜度向NEE方向穿越的距离超过2 000 m,依次进入飞仙关组、长兴组、龙潭组和茅口组。该井从井深3 200 m开始反复揭示龙潭组泥岩和茅口组三段灰岩,显示地层重复。经井-震标定和地震构造解释,发现该井钻进茅口组后,又钻遇至少6条小断层及其之间夹持的1—6号断块(图8)。这6条逆断层的垂向断距和水平延伸规模不及中组合Ⅲ级逆断层,属于Ⅲ级逆断层的伴生逆断层。

钻井全烃含量检测数据显示,该井在长兴组中部灰岩层段、龙潭组暗色页岩和煤岩层段及1—6号断块内均见显著气测异常(图9),且在埋深3 529.00 ~ 3 539.00 m(F2断层附近),3 669.00 ~ 3 670.00 m(3号断块内)和3 742.00 ~ 3 745.00 m(F3断层附近)见气侵,在埋深4 038.52 m和4 095.22 m处(4号断块内)

分别漏失钻井液4.35 m³和38.40 m³。测井综合解释表明,上述气测异常层段(除龙潭组页岩和煤层外)裂缝发育。以裂缝发育、斯通利波能量衰减明显和井旁缝洞体反射明显为气层评价标准,对上述气测异常层段进行综合解释,共获得气层9层,累计厚度达107.4 m,揭示该井钻遇的断层和裂缝带形成了有效的断控缝洞型气藏。

4.2 DX1井区断控缝洞型气藏特征

DX1井以斜井轨迹钻穿飞仙关组至栖霞组过程中,共识别出4段典型气测异常。其中,①号异常段为龙潭组页岩-煤层段,属于自生自储型页岩气/煤层气;②—④号异常段分别对应茅口组一段、茅口组二段和栖霞组缝洞发育带(图10a),其空间展布与F1—F3逆断层破碎带呈显著耦合关系(图10b)。因此,可认为②—④气测异常段是缝洞型气藏的响应。

DX1井成像测井资料的系统分析表明,嘉陵江组、飞仙关组、茅口组和栖霞组一段发育多套裂缝(图10a;表1)。嘉陵江组三段(埋深1 348.52 ~ 1 349.62 m)发育1.11 m厚裂缝带,以高角度缝为主(倾角40° ~ 80°);飞仙关组底部(埋深2 153.06 ~ 2 153.80 m)发育0.74 m厚裂缝带,以中-高角度缝为主(倾角40° ~ 70°);长兴组(埋深2 222.21 ~ 2 226.19 m)发育3.97 m厚裂缝带,即裂缝带①,高、低角度裂缝均有分布(倾角10° ~ 90°);茅口组一段a亚段(埋深2 513.18 ~ 2 539.18 m)沿F1断层发育溶蚀带(厚度0.25 m)和3组裂缝系统(累计厚度为4.25 m),以中-高角度缝为主(倾角20° ~ 70°),即裂缝带②;茅口组一段b亚段(埋深2 697.15 ~ 2 698.11 m)受F2断层控制,发育厚度为0.96 m的裂缝带,具典型破碎带结构,以中-高角度缝为主(倾角20° ~ 70°),即裂缝带③;栖霞组(埋深2 799.25 ~ 2 825.11 m)受F3断层影响,伴生双裂缝层(累计厚度为4.44 m),呈现多期破裂叠加特征,以高角度缝为主(倾角30° ~ 90°),为裂缝带④(图10a;表1)。

裂缝带产状参数分析表明,高导缝的走向主要为NE-SW向,与地层走向一致,而绝大多数倾向为SE向,少量为NW向。高角度缝和低角度缝均有发育,但整体以中-高角度裂缝发育为主。整体来看,中组合内发育的高导缝产状特征和发育位置与Ⅲ级逆断层基本一致,表明该区高导缝的形成主要受控于这些Ⅲ级逆断层。此外,高阻缝也表现出类似特征,但该类裂缝不及高阻缝发育程度高,因此其走向和倾向分布相对分散(图10b,c)。

综上所述,研究区DX1和DX2井区气藏形成受控

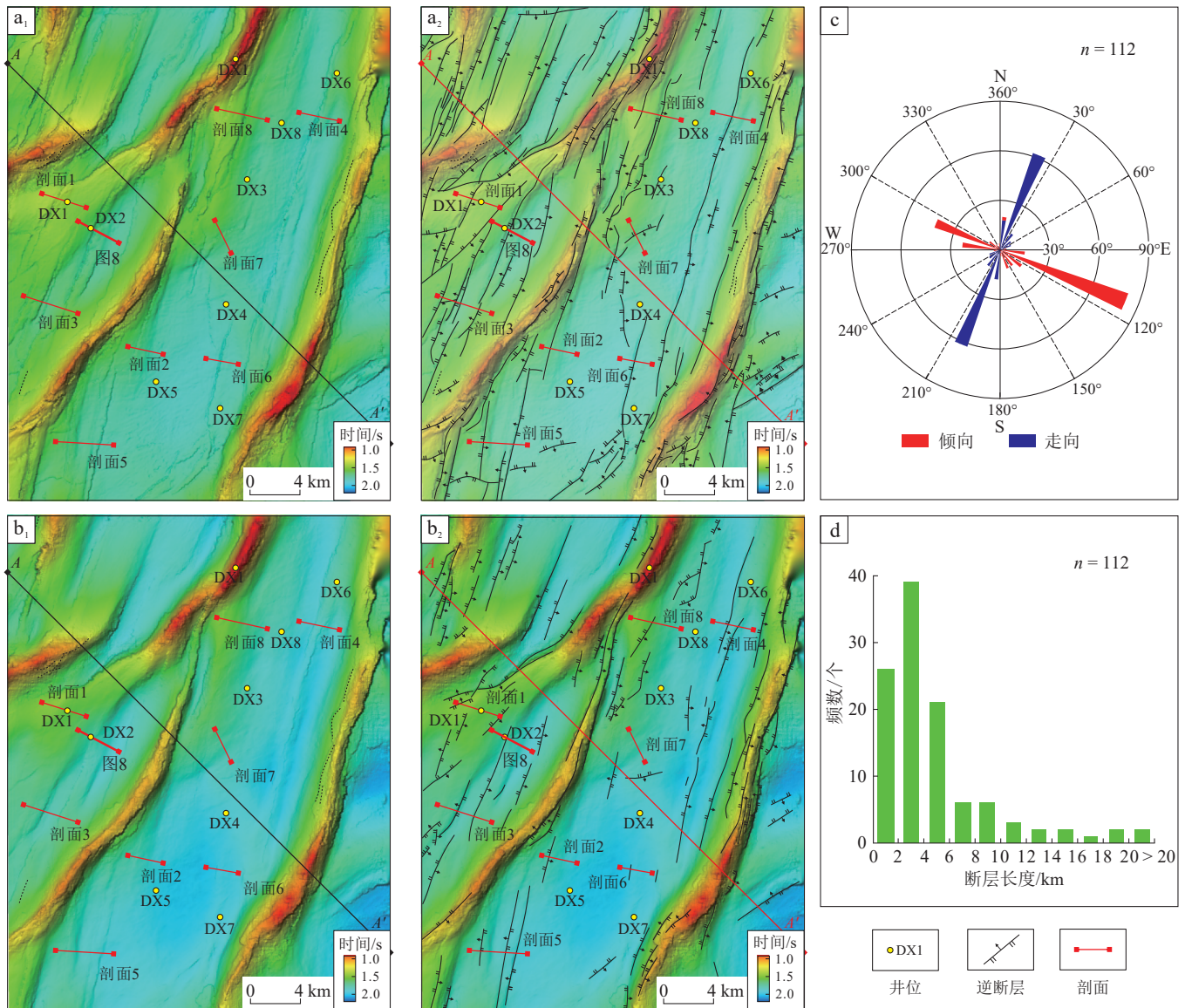


图6 大安地区三维地震工区龙潭组底界和嘉陵江组底界等 T_0 图及断裂系统特征

Fig. 6 Contour maps of the T_0 sequences and diagrams of the fault system at the bottom boundaries of the Longtan and Jialingjiang formations, Da'an 3D acreage

a₁. 龙潭组底界层面特征; a₂. 龙潭组底界断层分布特征; b₁. 嘉陵江组底界层面特征; b₂. 嘉陵江组底界断层分布特征; c. 断层倾向和走向分布玫瑰花图; d. 断层长度频数分布直方图

于“断层破碎成储—油气近源输导—复合缝洞体差异聚集”过程。Ⅲ级逆断层活动导致茅口组—栖霞组碳酸盐岩产生碎裂化改造,形成连通性良好的裂缝网络^[70]。此外,钻井数据和三维远场波场探测数据分析表明,裂缝带不仅在断层附近发育,在断层不发育的层系也可见到溶蚀带和裂缝带。因此,断层破碎带与层间岩溶带主控下的裂缝与溶蚀储集空间共同发育,进而构成复合储集体(图10d;表1)。在该背景下,奥陶系五峰组—志留系龙马溪组海相深水陆棚相页岩^[68]、茅口组一段富碳组构碳酸盐岩^[22, 70]和二叠系龙潭组海陆过渡相页岩^[59, 71-72]等优质烃源岩生成的油气以断层

带为优势运移通道,通过“下生上储”“上生下储”“自生自储”等多种形式进行近源差异运移和聚集^[54](图8,图10),并通过裂缝系统侧向调整,最终在复合缝洞型储集体中富集成藏。

5 大安地区缝洞型气藏勘探启示

大安地区 DX1 井和 DX2 井的断控缝洞型气藏解析表明,中组合Ⅲ级逆断层及其伴生低级别逆断层均可形成碳酸盐岩裂缝系统,具备良好的成藏条件。基于川南大安地区Ⅲ级逆断层的构造特征、分布规律和

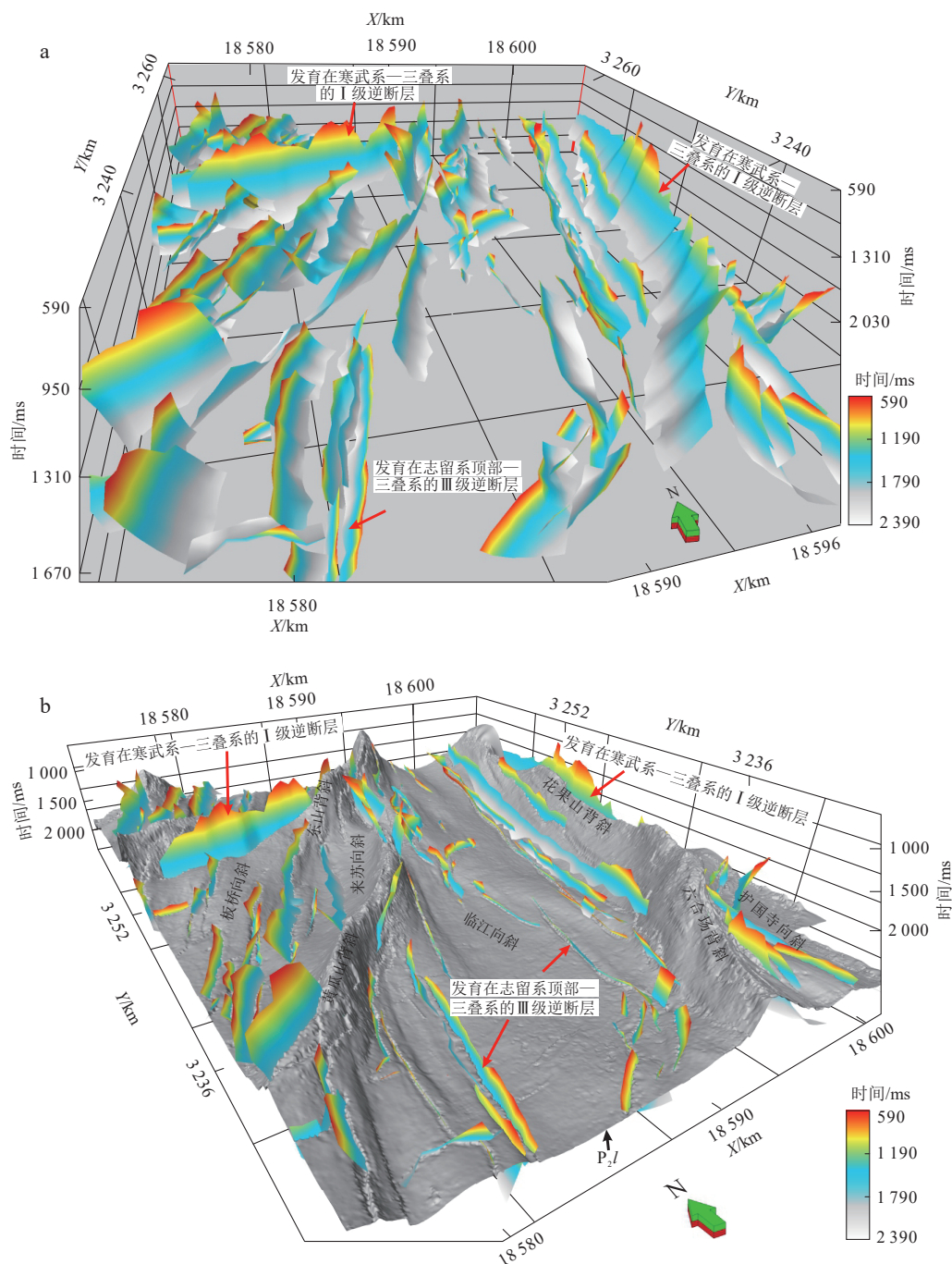


图7 大安地区二叠系-三叠系碳酸盐岩三维断层构造模型

Fig. 7 3D structural models of faults in the Permian-Triassic carbonate strata in the Da'an area

a. 三叠系及之下断层三维构造模型; b. 叠加二叠系梁山组底界面层的三维构造模型

(X为南北方向大地坐标轴; Y为东西方向大地坐标轴。)

三维建模结果,认为该断裂系统的累计长度为530 km、单侧碳酸盐岩破碎带面积360 ~ 600 km²,显示出规模性断控缝洞型气藏的勘探潜力。然而,此类气藏的地质预测与高效开发仍面临以下挑战。

5.1 储层非均质性制约

DX1井和DX2井的成像测井解释及钻井取心表

明,Ⅲ级逆断层伴生的缝洞型储层具有显著非均质性。该特性与裂缝、溶蚀孔洞被后期方解石为主的胶结物充填有关,这显著削弱了裂缝带成为优质储层的潜力,也为此类储层的地质、地震预测带来较大不确定性。从已有的钻井成果看,断层错断的碳酸盐岩层段普遍存在气测异常,表明碳酸盐岩断裂破碎带具备发育裂缝型储层的潜力,因而深入分析断层附近潜在破碎带

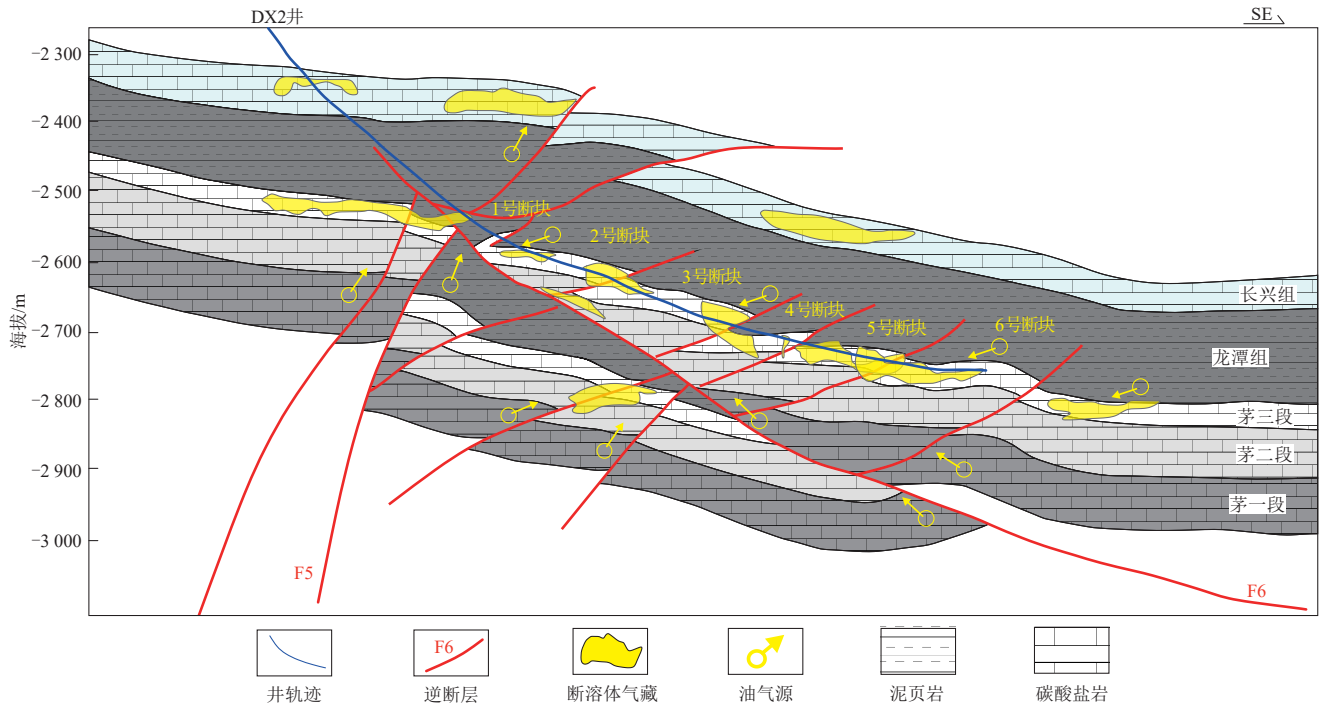


图8 大安地区东山背斜DX2井断溶体气藏地质剖面(剖面位置见图6a₁)

Fig. 8 Geological profile of fault-karst gas reservoirs in well DX2, Dongshan anticline, Da'an area (see Fig. 6a₁ for the profile location)

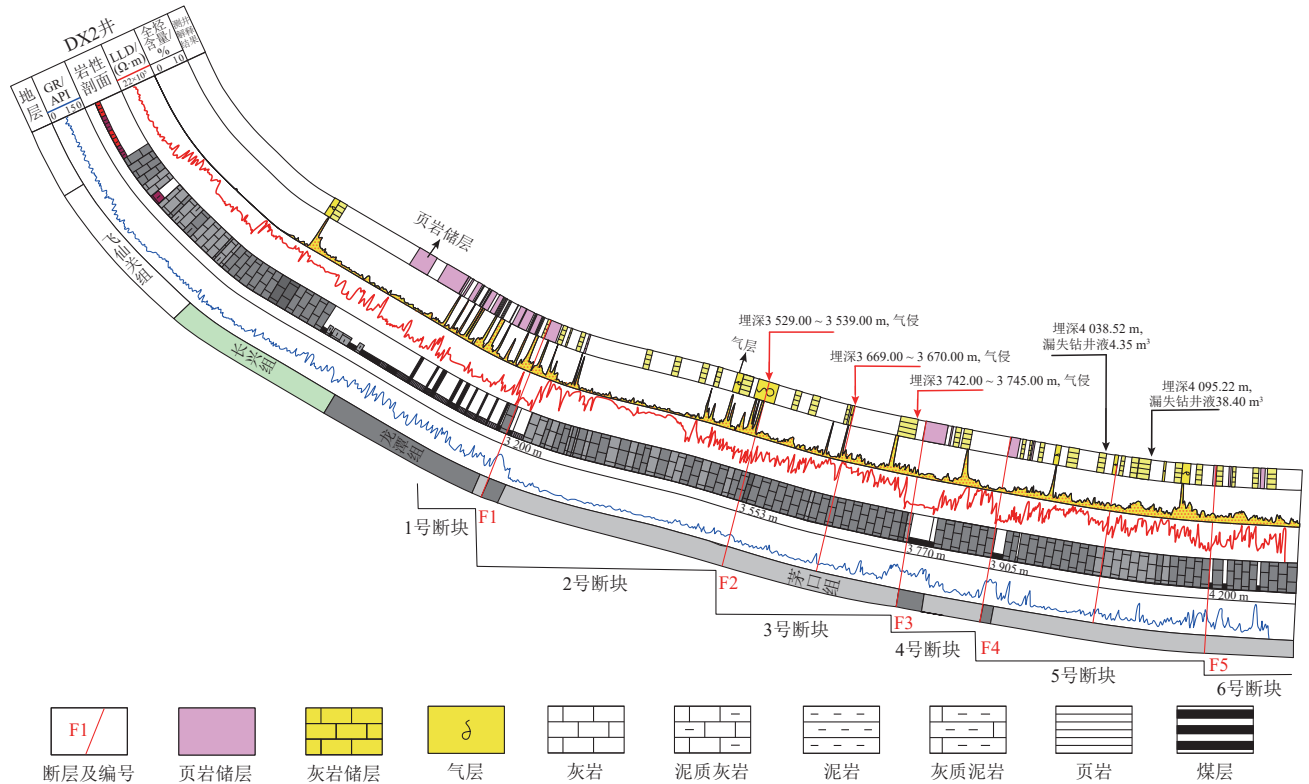


图9 大安地区东山背斜DX2井地层柱状图及断块油气显示情况

Fig. 9 Stratigraphic column of well DX2 and oil and gas shows in various fault blocks in the well in the Dongshan anticline, Da'an area

的地震波阻抗和频率、振幅等信息,有望为该储层的地震预测探索一条可行的道路,进而指导该区断控缝洞型储层勘探有利区的优选。

5.2 三维断层面约束的储层预测技术优化

本研究基于高精度三维地震构造解析、三维断层

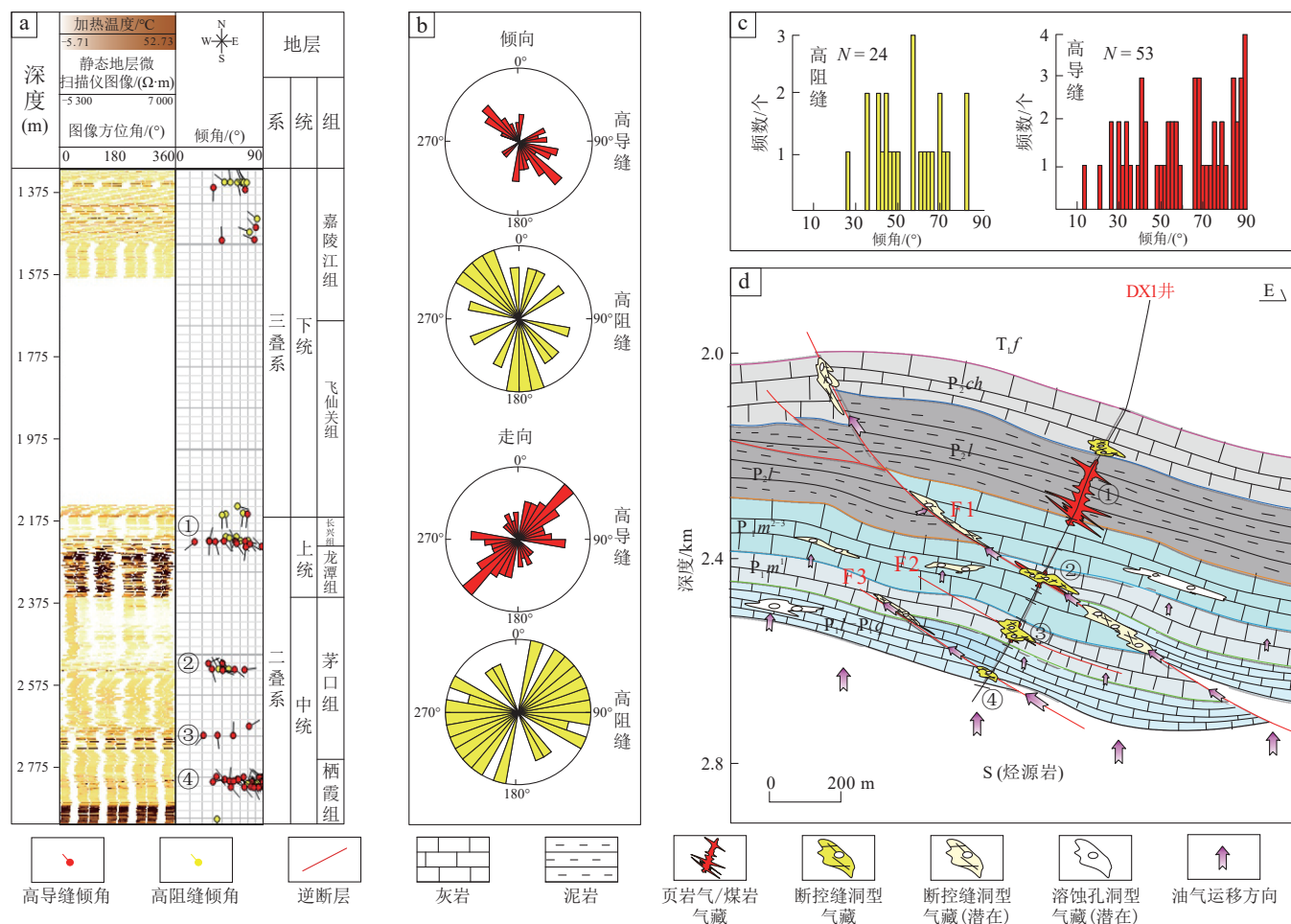


图10 大安地区DX1井二叠系-三叠系海相碳酸盐岩储层特征

Fig. 10 Reservoir characteristics of Permian-Triassic marine carbonate rocks in Well DX1, Da'an area

a. 成像测井图像;b. 裂缝倾向和走向玫瑰花图;c. 裂缝倾向角频率分布直方图;d. 断溶体气藏地质剖面

(①—④为二叠系内不同段的气测异常位置对应裂缝带编号。)

 T_{1f} 飞仙关组; P_{2ch} 长兴组; P_{1m}^{2-3} 茅口组二段-三段; P_{1m}^1 茅口组一段; $P_{1l}-P_{1q}$ 龙潭组-栖霞组;S. 志留系

表1 大安地区东山背斜DX1井区实钻裂缝带和溶蚀带统计

Table 1 Statistics of fracture and dissolution zones encountered during the drilling of well block DX1 in the Dongshan anticline, Da'an area

序号	顶深/m	底深/m	厚度/m	类型	地层
1	1 348.52	1 349.62	1.11	裂缝带	嘉陵江组三段
2	2 153.06	2 153.80	0.74	裂缝带	飞仙关组一段
3	2 222.21	2 226.19	3.97	裂缝带	长兴组
4	2 513.18	2 513.43	0.25	溶蚀带	茅口组一段a亚段
5	2 521.69	2 522.17	0.48	裂缝带	茅口组一段a亚段
6	2 525.42	2 526.46	1.04	裂缝带	茅口组一段a亚段
7	2 536.46	2 539.18	2.73	裂缝带	茅口组一段a亚段
8	2 697.15	2 698.11	0.96	裂缝带	茅口组一段b亚段
9	2 799.25	2 800.99	1.74	裂缝带	栖霞组一段a亚段
10	2 822.41	2 825.11	2.70	裂缝带	栖霞组一段a亚段

组合,构建了中组合Ⅲ级逆断层的三维构造模型,其在断控缝洞型储层预测和评价方面的价值仍有待深入挖

掘。对比常规岩溶储层研究中采用的沿层地震属性分析方法,断控缝洞型储层研究需创新三维断层面约束的储层预测技术框架,基于三维断层面几何形态,刻画碳酸盐岩破碎带空间展布,从而厘定破碎带边界;提取断层带相干、曲率及频谱衰减属性,明确储层敏感参数,以开展断控缝洞型甜点储层地球物理预测;分析断层上、下盘岩性接触关系,岩性对接评价,进而划分储层发育优势区。通过建立三维断层约束储层预测技术,可为断控缝洞型储层预测提供新方法,从而提升勘探目标定位精度,优化勘探开发方案。

5.3 小尺度逆断层成藏潜力探索

DX2井钻探结果证实,小尺度逆断层对川南大安地区的碳酸盐岩缝洞型气藏具有显著控制作用,将勘探目标从区域Ⅲ级主断层拓展至更小尺度的伴生断层、裂缝系统,为大安地区中组合断控油气藏的勘探拓

宽了思路。然而,受限于现有地震资料分辨率,碳酸盐岩储层发育段内的小尺度断层识别率严重不足。因此,亟需提升地震成像精度,为小尺度断层控藏评价奠定基础。后期在地震数据采集与处理优化,井震联合与地质统计约束,地震属性提取和机器学习融合等方面可加强攻关。

5.4 地质-工程一体化的甜点储层开发难题

研究揭示栖霞组-茅口组内发育的 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 低角度逆断层体系,其伴生的缝洞型储集空间不仅沿断裂带集中分布,在断层围岩区域也形成次生缝洞网络。如何构建三维地质模型实现储集体精细刻画,并据此设计最优井轨迹以最大限度揭露储集单元,成为实现效益开发的核心问题。DX2井应用大斜度长水平井技术取得突破性进展,证实该井型可将断控缝洞体钻遇率大幅度提升,同时提升单井产能。因此,钻前开展三维地震精细解释、地质力学建模与裂缝预测,钻井过程中通过地质导向实时调整井眼轨迹使之串接多个缝洞单元,并实施井轨迹动态优化,最终形成勘探-开发一体化的立体开发模式,是实现对此类型气藏地质-工程一体化勘探开发的重要途径。

6 结论

1) 大安地区发育由中寒武统膏岩、志留系页岩及嘉陵江组膏岩构成的多级滑脱层系,形成多级滑脱冲断褶皱系统。其中,中组合Ⅲ级逆断层作为层内调节构造,主要分布于向斜区,呈现上陡下缓的几何特征,以茅口组为代表的最大倾滑位移量可达550 m,向上至飞仙关组则逐渐消失。

2) 三维构造模型揭示出中组合Ⅲ级逆断层系统具有显著勘探价值:大安三维区内发育的110余条断层累计延伸530 km,其中单条断层延伸长度普遍小于6 km,但局部可达20 km;研究区内断层破裂规模大,单侧碳酸盐岩破碎带面积可达360~600 km²。

3) 进一步通过已钻井证实,大安地区中组合茅口组、栖霞组发育与Ⅲ级断层走向一致的断控缝洞型气藏,呈现出“断层破碎成储-油气近源输导-复合缝洞体差异聚集”的成藏模式,为川南二叠系-三叠系碳酸盐岩油气勘探拓展了新领域。

参 考 文 献

[1] 贾承造, 马德波, 袁敬一, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造特征、形成演化与成因机制[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 81-91.

JIA Chengzao, MA Debo, YUAN Jingyi, et al. Structural characteristics, formation & evolution and genetic mechanisms of strike-slip faults in the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 81-91.

[2] 李世银, 罗泉, 王彭, 等. 逆冲断裂对富满油田哈得区块油气成藏的控制作用[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1303-1311.

LI Shiyin, LUO Xiao, WANG Peng, et al. Control action of thrust fault to oil and gas accumulation in Hade block of the Fuman Oilfield [J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(6): 1303-1311.

[3] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335-349.

SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335-349.

[4] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 83-95.

LIU Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin-taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike slip fault zones as examples [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 83-95.

[5] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.

JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.

[6] 云露, 邓尚. 塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 770-787.

YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: A case study of Shunbei oil and gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 770-787.

[7] 张宁, 曹飞, 李宗宇, 等. 顺北超深断控凝析气藏流体非平衡相变对开采效果影响[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(3): 471-478.

ZHANG Ning, CAO Fei, LI Zongyu, et al. Impact of non-equilibrium phase transition of reservoir fluid on production performance in Shunbei ultra-deep fault-controlled condensed gas reservoir [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 471-478.

[8] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断控储控藏作用及勘探潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1296-1310.

HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1296-1310.

[9] BIAN Qing, ZHANG Jibiao, HUANG Cheng. The Middle and Lower Cambrian salt tectonics in the central Tarim Basin, China: A case study based on strike-slip fault characterization [J]. Energy

- Geoscience, 2024, 5(2): 100254.
- [10] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1-17.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [11] 乔俊程, 常少英, 曾溅辉, 等. 塔里木盆地北部富满地区超深层走滑断裂带碳酸盐岩油气差异成藏成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1226-1246.
QIAO Juncheng, CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, et al. Origin of differential hydrocarbon accumulation in ultra-deep carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Fuman area, northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1226-1246.
- [12] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 203-212.
DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 203-212.
- [13] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 14-22.
LYU Haitao, HAN Jun, ZHANG Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(1): 14-22.
- [14] 李海英, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 107-120.
LI Haiying, LIU Jun, GONG Wei, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei area [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 107-120.
- [15] 刘宝增, 漆立新, 李宗杰, 等. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 412-420.
LIU Baozeng, QI Lixin, LI Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 412-420.
- [16] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12.
- [17] 程洪, 张杰, 张文彪. 断溶体储层类型识别、预测及发育模式探讨——以塔里木盆地塔河十区TH10421单元为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 996-1003.
CHENG Hong, ZHANG Jie, ZHANG Wenbiao. Discussion on identification, prediction and development pattern of faulted-karst carbonate reservoirs: A case study of TH10421 fracture-cavity unit in block 10 of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 996-1003.
- [18] 刘雨晴, 邓尚, 李海英, 等. 深层碳酸盐岩低序级断裂体系发育特征及勘探启示: 以塔里木盆地顺北油气田为例[J]. 地球科学, 2025, 50(6): 2239-2254.
LIU Yuqing, DENG Shang, LI Haiying, et al. Development Characteristics and Exploration Implications of Low-Order Fault Systems in Tarim Basin: An Example from Shunbei Oil and Gas Field [J]. Earth Science, 2025, 50(6): 2239-2254.
- [19] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [20] 丁志文, 汪如军, 陈方方, 等. 断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律——以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 286-296.
DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, et al. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang Oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 286-296.
- [21] 李建忠, 谷志东, 鲁卫华, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大气田形成主控因素与勘探思路[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 13-26.
LI Jianzhong, GU Zhidong, LU Weihua, et al. Main factors controlling the formation of giant marine carbonate gas fields in the Sichuan Basin and exploration ideas [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 13-26.
- [22] 梁兴, 张磊, 蒋立伟, 等. 四川盆地渝西大安地区灰质源岩气勘探突破与资源潜力[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(2): 30-45.
LIANG Xing, ZHANG Lei, JIANG Liwei, et al. Exploration breakthrough and resource potential of limy source rock gas in Da'an area in the western Chongqing, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(2): 30-45.
- [23] 杨雨, 文龙, 谢继容, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 44-55.
YANG Yu, WEN Long, XIE Jirong, et al. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 44-55.
- [24] 马新华, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 1-13.
MA Xinhua, YANG Yu, WEN Long, et al. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 1-13.
- [25] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 15-27.
LIU Shugen, SUN Wei, ZHONG Yong, et al. Discussion on the

- theories of the hydrocarbon formation and distribution of the deep-seated marine carbonates in the Sichuan superimposed basin, China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(1): 15-27.
- [26] 洪海涛, 杨雨, 刘鑫, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊2): 64-73.
HONG Haitao, YANG Yu, LIU Xin, et al. The characteristics and development law of marine carbonate reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S2): 64-73.
- [27] 胡宗全, 王倩茹, 申宝剑, 等. 四川盆地地下古生界五峰组-龙马溪组海相页岩气储层孔隙分类及特征[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(3): 705-718.
HU Zongquan, WANG Qianru, SHEN Baojian, et al. Classification and characteristics of pores in marine shale gas reservoirs in the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(3): 705-718.
- [28] 何登发. 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*, 2022, 29(6): 24-59.
HE Dengfa. Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydrocarbon occurrence [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 24-59.
- [29] 管树巍, 梁瀚, 姜华, 等. 四川盆地中部主干走滑断裂带及伴生构造特征与演化[J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 252-264.
GUAN Shuwei, LIANG Han, JIANG Hua, et al. Characteristics and evolution of the main strike-slip fault belts of the central Sichuan Basin, southwestern China, and associated structures [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 252-264.
- [30] 苏楠, 杨威, 苑保国, 等. 四川盆地喜马拉雅期张扭性断裂构造特征及形成机制[J]. *地球科学*, 2021, 46(7): 2362-2378.
SU Nan, YANG Wei, YUAN Baoguo, et al. Structural features and deformation mechanism of transtensional faults in Himalayan period, Sichuan Basin [J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2362-2378.
- [31] 刘树根, 邓宾, 李智武, 等. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 621-635.
LIU Shugen, DENG Bin, LI Zhiwu, et al. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: A case study from Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 621-635.
- [32] 何治亮, 汪新伟, 李双建, 等. 中上扬子地区燕山运动及其对油气保存的影响[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(1): 1-11.
HE Zhiliang, WANG Xinwei, LI Shuangjian, et al. Yanshan movement and its influence on petroleum preservation in middle-upper Yangtze region [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2011, 33(1): 1-11.
- [33] 石司宇, 李毕松, 李让彬, 等. 川东南地区典型走滑断裂带特征及断控缝洞型储层发育潜力[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 288-300.
SHI Siyu, LI Bisong, LI Rangbin, et al. Typical strike-slip fault zones in southeastern Sichuan: Fault characteristics and potential for fault-controlled fractured vuggy reservoirs [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 288-300.
- [34] 梁兴, 单长安, 张磊, 等. 中国南方复杂构造区多类型源内成储成藏非常规气勘探开发进展及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2179-2199.
- LIANG Xing, SHAN Changan, ZHANG Lei, et al. Exploration and development progresses and resource potentials of multi-type unconventional gas reservoirs characterized by in-source reservoir and accumulation in complex tectonic areas of southern China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2179-2199.
- [35] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(4): 461-469.
LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: Taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(4): 461-469.
- [36] LI Yongqiang, SUN Jianfang, WEI Hehua, et al. Architectural features of fault-controlled karst reservoirs in the Tahe Oilfield [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106208.
- [37] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义——以顺北地区1号和5号断裂为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 906-923.
LIN Bo, ZHANG Xu, KUANG Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and their hydrocarbon significance: A case study of No. 1 fault and No. 5 fault in Shunbei area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 906-923.
- [38] 刘雨晴, 邓尚. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 124-136.
LIU Yuqing, DENG Shang. Structural analysis of intraplate strike-slip faults with small to medium displacement: A case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 124-136.
- [39] WIBBERLEY C A J, YIELDING G, DI TORO G, et al. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: A review [M]//WIBBERLEY C A J, KURZ W, IMBER J, et al. *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties*. London: Geological Society of London, 2008: 5-33.
- [40] 侯加根, 马晓强, 刘钰铭, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层多类多尺度建模方法研究: 以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 59-66.
HOU Jiagen, MA Xiaoliang, LIU Yuming, et al. Modelling of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 59-66.
- [41] 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北油气田断控缝洞型储层特征与主控因素[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(5): 8-13.
ZHAO Rui, ZHAO Teng, LI Huili, et al. Fault-controlled fracture-cavity reservoir characterization and main-controlling factors in the Shunbei hydrocarbon field of Tarim Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(5): 8-13.
- [42] 王清华, 蔡振忠, 张银涛, 等. 塔里木盆地超深层走滑断控油藏研究进展与趋势[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(4):

- 379-386.
- WANG Qinghua, CAI Zhenzhong, ZHANG Yintao, et al. Research progress and trend of ultra-deep strike-slip fault-controlled hydrocarbon reservoirs in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(4): 379-386.
- [43] 徐珂, 张辉, 尹国庆, 等. 塔里木盆地富满油田断控缝洞型储层现今地应力特征及应用[J]. *地质通报*, 2025, 44(2-3): 232-244.
- XU Ke, ZHANG Hui, YIN Guoqiang, et al. The characteristics of in-situ stress and its application in the fault-controlled fracture-vug reservoirs in the Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(2-3): 232-244.
- [44] 尚浩杰, 陈叔阳, 何云峰, 等. 断控缝洞型碳酸盐岩储层结构表征与三维地质建模——以顺北4号断裂带为例[J]. *石油学报*, 2024, 45(11): 1662-1679.
- SHANG Haojie, CHEN Shuyang, HE Yunfeng, et al. Structural characterization and 3D geological modeling of fault-controlled fracture-cavity carbonate reservoirs: A case study of Shunbei No. 4 fault zone [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(11): 1662-1679.
- [45] REN Qiqiang, GAO Jinliang, ZHU Peng, et al. A novel fracture-cavity reservoir outcrop geological knowledge base construction method considering parameter collection and processing, mutual transformation of data-knowledge, application and update [J]. *Petroleum Science*, 2024, 21(4): 2184-2202.
- [46] 李宗杰, 杨子川, 李海英, 等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. *石油物探*, 2020, 59(2): 283-294.
- LI Zongjie, YANG Zichuan, LI Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(2): 283-294.
- [47] HU Xiangyang, ZHENG Wenbo, ZHAO Xiangyuan, et al. Quantitative characterization of deep fault-karst carbonate reservoirs: A case study of the Yuejin block in the Tahe Oilfield [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(3): 100153.
- [48] 商晓飞, 段太忠, 张文彪, 等. 断控岩溶主控的缝洞型碳酸盐岩内部溶蚀相带表征——以塔河油田10区奥陶系油藏为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 329-341.
- SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, et al. Characterization of dissolution facies belt in fracture-cavity carbonate rocks mainly controlled by fault-controlling karst: A case study of Ordovician reservoirs in the Block 10 of Tahe Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 329-341.
- [49] 王立歆, 李海英, 李弘, 等. 复杂地质条件下超深层碳酸盐岩断控缝洞体成像及预测技术[J]. *石油物探*, 2022, 61(5): 865-875.
- WANG Lixin, LI Haiying, LI Hong, et al. Imaging and prediction technology of fault-karst reservoirs in ultra-deep carbonate rocks under complex geological conditions [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(5): 865-875.
- [50] 张煜, 毛庆言, 李海英, 等. 顺北中部超深层断控缝洞型油气藏储集体特征与实践应用[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 1-13.
- ZHANG Yu, MAO Qingyan, LI Haiying, et al. Characteristics and practical application of ultra-deep fault-controlled fractured-cavity type reservoir in central Shunbei area [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 1-13.
- [51] 江同文, 韩剑发, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中隆起断控复式油气聚集的差异性及主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 213-224.
- JIANG Tongwen, HAN Jianfa, WU Guanghui, et al. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the Tazhong uplift, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 213-224.
- [52] 卜旭强, 王来源, 朱莲花, 等. 塔里木盆地顺北油气田奥陶系断控缝洞型储层特征及成藏模式[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 152-160.
- BU Xuqiang, WANG Laiyuan, ZHU Lianhua, et al. Characteristics and reservoir accumulation model of Ordovician fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 152-160.
- [53] 苏皓, 郭艳东, 曹立迎, 等. 顺北油田断控缝洞型凝析气藏衰竭式开采特征及保压开采对策[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(5): 178-188.
- SU Hao, GUO Yandong, CAO Liying, et al. Natural depletion characteristics and pressure maintenance strategies of fault-controlled fracture-cavity condensate gas reservoirs in Shunbei Oilfield [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(5): 178-188.
- [54] 曹自成, 云露, 漆立新, 等. 塔里木盆地顺北地区顺北84X井超千米含油气重大发现及其意义[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 341-356.
- CAO Zicheng, YUN Lu, QI Lixin, et al. A major discovery of hydrocarbon-bearing layers over 1,000-meter thick in Well Shunbei 84X, Shunbei area, Tarim Basin and its implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 341-356.
- [55] 韩剑发, 孙冲, 朱光有, 等. 超深断控碳酸盐岩油藏空间结构表征技术与工程实践[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(2): 255-268.
- HAN Jianfa, SUN Chong, ZHU Guangyou, et al. Spatial structure characterization technology and engineering practice of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoir [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(2): 255-268.
- [56] 鲁国, 田方磊, 何登发, 等. 四川盆地中部高石梯-磨溪地区F19走滑断裂带构造特征与演化[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2238-2253.
- LU Guo, TIAN Fanglei, HE Dengfa, et al. Structural Characteristics and Evolution of No. 9 Strike-Slip Fault Zone in Gaoshiti-Moxi Area in Central Sichuan Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2238-2253.
- [57] 邓宾. 四川盆地中—新生代盆—山结构与油气分布[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- DENG Bin. Meso-Cenozoic architecture of basin-mountain system in the Sichuan Basin and its gas distribution [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [58] 郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 等. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J]. *天然气工业*, 2021, 41(5): 11-19.
- GUO Weixing, TANG Jianming, OUYANG Jiasui, et al. Characteristics of structural deformation in the southern Sichuan

- Basin and its relationship with the storage condition of shale gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(5): 11-19.
- [59] 梁霄, 徐剑良, 王滢, 等. 川南地区渐变型盆—山边界条件下龙马溪组页岩气(藏)富集主控因素: 构造—沉积分异与差异性演化[J]. *地质科学*, 2021, 56(1): 60-81.
- LIANG Xiao, XU Jianliang, WANG Ying, et al. The shale gas enrichment factors of Longmaxi Formation under gradient basin-mountain boundary in South Sichuan Basin: Tectono-depositional differentiation and discrepant evolution [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1): 60-81.
- [60] 韩玲玲, 李熙喆, 刘照义, 等. 川南泸州深层页岩气井套变主控因素与防控对策[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 853-861.
- HAN Lingling, LI Xizhe, LIU Zhaoyi, et al. Influencing factors and prevention measures of casing deformation in deep shale gas wells in Luzhou block, southern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 853-861.
- [61] 张旭亮, 刘珠江, 陈超, 等. 高陡复杂构造带深层页岩气保存条件差异性分析——以川东南碛江高陡复杂构造带为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(6): 1121-1131.
- ZHANG Xuliang, LIU Zhujiang, CHEN Chao, et al. 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*, 2023, 45(6): 1121-1131.
- [62] 田方磊, 梁虹, 臧殿光, 等. 四川盆地南部泸州—云锦地区走滑断裂构造变形特征[J]. *地质科学*, 2024, 59(3): 804-818.
- TIAN Fanglei, LIANG Hong, ZANG Dianguang, et al. Structural characteristics of strike-slip faults in the Luzhou-Yunjin area, southern Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024, 59(3): 804-818.
- [63] 黄涵宇, 何登发, 李英强, 等. 四川盆地东南部泸州古隆起的厘定及其成因机制[J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 102-120.
- HUANG Hanyu, HE Dengfa, LI Yingqiang, et al. Determination and formation mechanism of the Luzhou paleo-uplift in the southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 102-120.
- [64] 谭万仓, 王显东, 李强, 等. 四川盆地中—北部中二叠统构造—沉积分异作用与油气勘探方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(2): 28-37.
- TAN Wancang, WANG Xiandong, LI Qiang, et al. Middle Permian tectono-depositional differentiation and oil and gas exploration direction in northern-central Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(2): 28-37.
- [65] 张本健, 彭思桥, 陈晓, 等. 德阳—安岳裂陷槽北段西边界地震识别及油气地质意义[J]. *特种油气藏*, 2025, 32(1): 32-39.
- ZHANG Benjian, PENG Siqiao, CHEN Xiao, et al. Seismic identification of the western boundary of the northern section of the Deyang-Anyue rift trough and its geological significance [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2025, 32(1): 32-39.
- [66] 屈海洲, 陈润, 徐伟, 等. 白云石胶结物特征及其对深层白云岩孔隙的作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2025, 55(2): 401-416.
- QU Haizhou, CHEN Run, XU Wei, et al. Characteristics of dolomite cement and its effect on the porosity of deep dolomite [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2025, 55(2): 401-416.
- [67] 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(1): 11-25.
- MEI Qinghua, HE Dengfa, 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.
- [68] 何登发, 李英强, 黄涵宇, 等. 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, 2020: 1-568.
- HE Dengfa, LI Yingqiang, HUANG Hanyu, et al. Formation and evolution of multicycle superimposed basins in Sichuan basin and hydrocarbon accumulation [M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-568.
- [69] 尹宏, 郑超, 王旭丽, 等. 川西南部地区雷口坡组天然气成藏条件及主控因素[J]. *断块油气田*, 2024, 31(6): 959-967.
- YIN Hong, ZHENG Chao, WANG Xuli, et al. Conditions and main controlling factors of natural gas accumulation of Leikoupo Formation in southwestern Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2024, 31(6): 959-967.
- [70] 何贵松, 孙斌, 高玉巧, 等. 川东南地区二叠系茅口组一段非常规天然气富集高产主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(2): 362-373.
- HE Guisong, SUN Bin, GAO Yuqiao, et al. Main factors controlling unconventional gas enrichment and high production in the first member of Permian Maokou Formation, southeastern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(2): 362-373.
- [71] 何贵松, 何希鹏, 高玉巧, 等. 重庆南川地区龙潭组页岩气地质特征与甜点优选[J]. *地质学报*, 2022, 96(6): 2131-2142.
- HE Guisong, HE Xipeng, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and sweet spot optimization of Longtan shale gas in the Nanchuan area, Chongqing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(6): 2131-2142.
- [72] 邱振, 窦立荣, 吴建发, 等. 川北—鄂西地区中二叠统层序岩相古地理演化及页岩气勘探潜力[J]. *地球科学*, 2024, 49(2): 712-748.
- QIU Zhen, DOU Lirong, WU Jianfa, et al. Lithofacies Palaeogeographic Evolution of the Middle Permian Sequence Stratigraphy and Its Implications for Shale Gas Exploration in the Northern Sichuan and Western Hubei Provinces [J]. *Earth Science*, 2024, 49(2): 712-748.

(编辑 王迪)