

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.054>



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

刘雨晴¹, 邓 尚^{1,2*}, 李海英², 郭康康¹, 刘大卫¹, 耿 锋², 汝智星¹, 彭威龙¹,
符东宇¹, 刘 爽¹

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011

摘 要: 塔里木盆地深层海相碳酸盐岩物性致密, 在应力集中下容易形成脆性变形, 表现为多序级高陡走滑断裂体系发育。其中, 低序级断裂(主干二级以下)“规模小、活动弱、方向杂”, 其分布及成因是构造领域近期研究的热点和难点问题。基于顺北地区连片三维地震资料, 开展了低序级断裂地球物理识别方法攻关和分布预测, 综合地震资料、钻井、测井资料的系统分析和野外多轮次踏勘, 揭示了顺北地区低序级断裂的展布规律、成因模式、成储成藏特征等, 初步提出勘探评价与部署思路建议: (1) 探索形成了一套“先增强预处理、后分区优选属性”的低序级断裂识别技术序列, 将低序级断裂带识别长度精度提高至 1 km; (2) 落实顺北中东部 NE 向、NEE 向、NW 向、近 NS 向和近 EW 向等 5 组走向低序级断裂, 并划分为近平行体系、锐夹角体系和近垂直体系等 3 种成因类型; (3) 明确低序级断裂内部通常不发育完整的核带结构, 由多组系裂缝带组成, 缺少大套角砾破碎带以及角砾空腔, 较主干断裂规模小、连通性弱, 易形成超压油气藏系统。本文指出寻找规模储集体目标对于低序级断控领域部署至关重要, 需考虑地质工程一体化, 优选低序级断裂高密度区的“串珠”并进行一井多靶井型设计。

关键词: 低序级断裂; 走滑断裂; 碳酸盐岩; 顺北油气田; 塔里木盆地; 石油地质。

中图分类号: P542; P618.1

文章编号: 1000-2383(2025)06-2239-16

收稿日期: 2025-01-05

Development Characteristics and Exploration Implications of Low-Order Fault Systems in Tarim Basin: An Example from Shunbei Oil and Gas Field

Liu Yuqing¹, Deng Shang^{1,2*}, Li Haiying², Guo Kangkang¹, Liu Dawei¹, Geng Feng², Ru Zhixing¹,
Peng Weilong¹, Fu Dongyu¹, Liu Shuang¹

1. *Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*

2. *Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China*

Abstract: The deep-margin carbonate rocks in the Tarim basin exhibit dense physical properties and are prone to brittle deformation under stress concentration, resulting in the development of multi-order strike-slip fault systems. However, due to the

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(Nos.U21B2063, U24B6001, 42472220).

作者简介: 刘雨晴(1990—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事构造地质方面研究。ORCID: 0000-0002-1082-1318. E-mail: liuyqsmile@163.com

*** 通讯作者:** 邓尚, 研究员, 主要从事构造地质与石油地质综合研究。E-mail: shang_deng@126.com

引用格式: 刘雨晴, 邓尚, 李海英, 郭康康, 刘大卫, 耿锋, 汝智星, 彭威龙, 符东宇, 刘爽, 2025. 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. 地球科学, 50(6): 2239–2254.

Citation: Liu Yuqing, Deng Shang, Li Haiying, Guo Kangkang, Liu Dawei, Geng Feng, Ru Zhixing, Peng Weilong, Fu Dongyu, Liu Shuang, 2025. Development Characteristics and Exploration Implications of Low-Order Fault Systems in Tarim Basin: An Example from Shunbei Oil and Gas Field. *Earth Science*, 50(6): 2239–2254.

characteristics of low-order faults being ‘small in scale, weak in activity, and diverse in direction’, their distribution and genesis have been argumentative in current structural research. Based on the high-quality 3D seismic data of the Shunbei area, it built the geophysical identification methods and distribution prediction of low-order faults. Through the systematic analysis of seismic, drilling, logging and field survey data, the distribution patterns, genesis models, and characteristics of reservoir formation of low-order faults in the Shunbei area were revealed. Preliminary suggestions for exploration evaluation and deployment strategies were proposed. (1) A technical sequence for identifying low-order faults was developed, which involves ‘enhanced geophysical preprocessing first, followed by optimal attribute selection of sub-regions’. This results in improving the identification accuracy of low-order faults to 1 km in length. (2) Five sets of NE, NEE, NW, near NS, and near EW trending low-order faults in the northeastern central Shunbei area were recognised, and classified into three genetic types: nearly parallel system, acute angle system, and near vertical system. (3) Low-order faults typically do not develop a complete fault core-damage zone architecture, but consist of multiple sets of fracture zones, lacking large angular gravel breccia zones and angular gravel cavities. It is smaller in scale and weaker with connectivity compared to main strike-slip faults, making them preferred for forming overpressured oil and gas reservoir systems. Identifying target reservoirs with a certain scale is crucial for the decision of the low-order faults exploration, requiring consideration of geology-engineering integration, preferentially selecting beads-shaped reflections in high-density areas of low-order faults and designing Multi-Target Well.

Key words: low-order fault; strike-slip fault; carbonate rock; Shunbei oil and gas field; Tarim basin; petroleum geology.

0 引言

近年来,塔里木盆地顺北油气田的成功勘探实践证实盆地腹部高陡走滑断裂带具有“控储、控输、控藏、控富”特征,揭示了走滑断控缝洞型新类型油气藏,中一下奥陶统一间房组—鹰山组致密碳酸盐岩是主要油气产层(漆立新,2020;云露和朱秀香,2022;曹自成等,2024)。“十三·五”期间,随着三维地震资料覆盖率的不断提高,顺北地区主干走滑断裂展布格局逐渐清晰,现已落实18条主干走滑断裂带(邓尚等,2021;云露和邓尚,2022;刘雨晴等,2023),已提交储量区沿主干断裂呈条带状展布,而主干断裂之间区域储量亟待整体揭示。

近期,顺北油气田主干断裂之间低序级断裂获得多点突破,证实低序级断控领域可成为主干断裂之外新的规模储量接替阵地。然而,低序级断裂具有“规模小、活动弱、方向杂”的特点,受限于顺北超深层低主频地震资料背景,导致其难识别、难解析。此外,前期关于低序级断裂的研究主要针对其断控储集体的地球物理响应——“串珠”,而尚未从地质研究的角度明确低序级断裂体系的展布规律及成藏特征,因而制约了该领域规模展开。

鉴于此,在前人研究的基础上,利用超深层地震资料特点进行了针对性的低序级断裂地球物理识别方法攻关,综合地震资料、钻井、测井资料的系统分析和野外多轮次踏勘,揭示了顺北地区低序级断裂的展布规律、成因模式、成储成藏特征等,初步提出勘探评价与部署思路建议,以期深化塔里木

盆地克拉通内多序级走滑断裂体系的系统认识、超深层走滑断控缝洞型油气藏的勘探评价提供借鉴。

1 区域地质概况

顺北油气田主体位于塔里木盆地腹部顺托果勒低隆起区。该低隆北邻塔北隆起、南邻卡塔克隆起,东西向位于阿瓦提坳陷与满加尔坳陷之间(图1)。顺托果勒低隆起虽是相对稳定的古构造单元,但古生代以来经历了多阶段构造演化活动,历经加里东早期克拉通内弱伸展背景下的稳定构造沉降、加里东中晚期—海西早期区域挤压背景下的低隆起形成和发育、海西中晚期和印支期以来的调整改造,最终形成现今构造格局(何登发等,2008;安海亭等,2009;邓尚等,2018)。在长期稳定沉降过程中,寒武系—中下奥陶统碳酸盐岩被持续深埋,中下奥陶统顶面现今的埋深普遍超过7 800 m。中下奥陶统深埋碳酸盐岩普遍致密,非均质性强,基质的平均孔隙度小于1.08%,这类超深致密碳酸盐岩有效的储集空间主要为走滑断裂的次生改造密切相关走滑断控储集体(李映涛等,2023)。

前期针对塔里木盆地主次级走滑体系的研究表明(Deng *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2021, 2022; 刘雨晴和邓尚, 2022; 陈红汉, 2023; 何松高等, 2023; 唐大卿等, 2023),盆地内部一级走滑断裂可横跨多个构造单元,延伸距离普遍在百公里级别,位移量在1 km以上;二级走滑断裂多在一级构造单元内部,延伸距离超过50 km,位移量在百米以上;三级及以

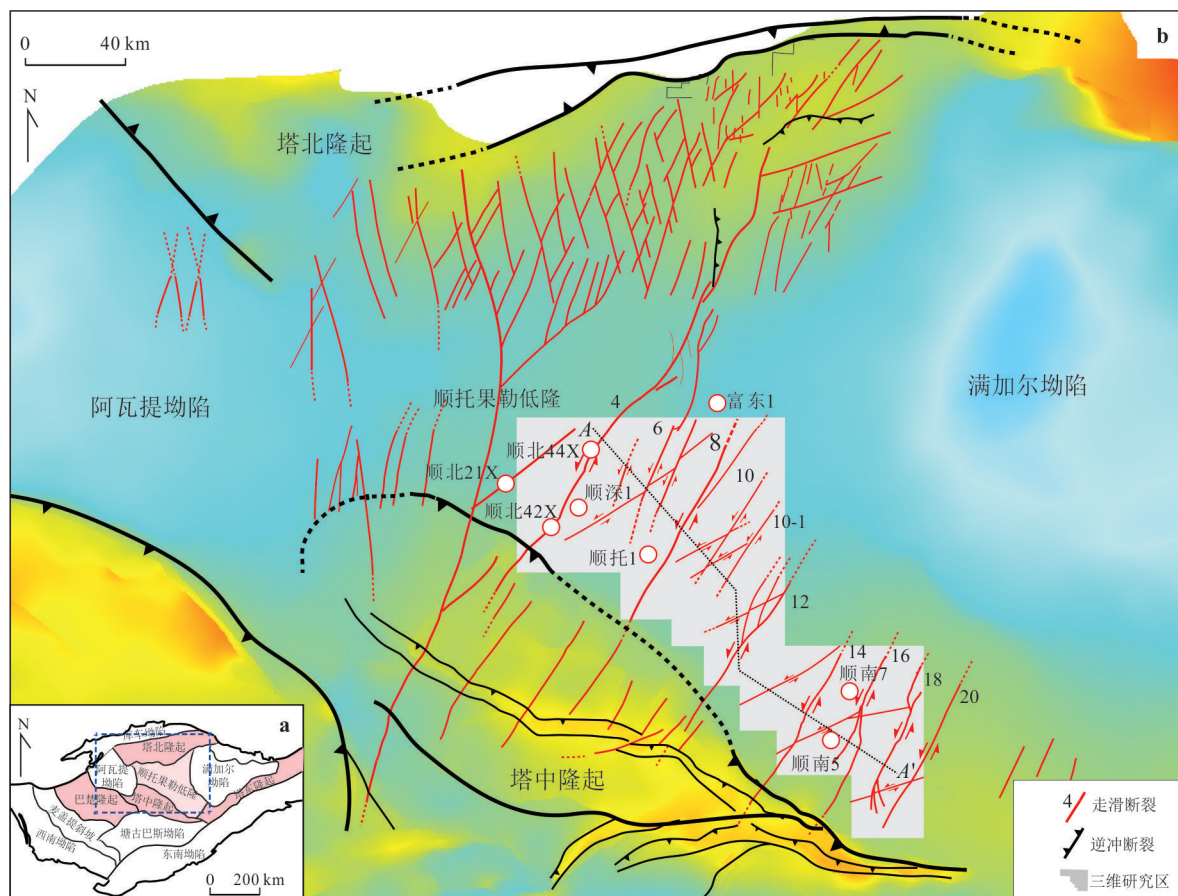


图1 塔里木盆地顺北地区及邻区构造单元及中奥陶统碳酸盐顶面走滑断裂体系分布

Fig.1 The tectonic units and distribution of major faults in the Lower Paleozoic in the Shunbei area and the surroundings

下断裂平面延伸距离小于50 km,位移量在百米以下.结合顺北油气田的勘探实践,将一级、二级走滑断裂称为主干走滑断裂,三级及以下走滑断裂称为低序级断裂.

高精度三维地震资料揭示,顺北地区主干走滑断裂体系具有东西分区展布的特征,以顺北5号断裂为界,以东主要发育北东向近平行走滑断裂体系,以西主要发育北西向近平行走滑断裂体系,本文研究区为顺北5号带以东区域(图1).研究区内,NE向主干断裂带普遍具有“平面分段、纵向分层、多期活动”的时空结构特征,自西向东断裂带的间距减小、活动强度增大、挤压程度增强(图2)(邓尚等,2018;Deng *et al.*,2019;刘雨晴等,2023).在盆缘多期次构造事件的影响下,NE向主干走滑断裂带多经历了多期构造演化过程:加里东中期I幕,塔里木盆地西南缘受到西昆仑造山的NE向区域挤压应力,同时在北部被动陆缘形成近NS向挤压,斜向挤压作用下形成区域节理系;加里东中期III幕,除了西南缘的NE向斜压活动,盆地东南缘受阿尔金

造山NW向挤压应力,节理系逐渐贯通发育成走滑断裂;之后,NE向走滑断裂在北天山洋闭合过程中,经历了加里东晚期—海西早期以及海西中—晚期的斜拉或纯剪活动(云露,2021;邓尚等,2021).此外,研究区还发育一套NEE向二级主干断裂体系,与NE向主干断裂带呈 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 夹角相间排列.整体上,NEE向断裂也呈现出自西向东活动性增强的特点,但较NE向主干断裂活动强度弱、期次单一,剖面揭示仅经历了加里东中期III幕这一期活动(图2)(Qiu *et al.*,2022).

2 低序级走滑断裂地球物理表征方法

塔里木盆地顺北地区奥陶系碳酸盐岩地层顶面埋深大于7 000 m,主频最大不超过20 Hz,较低分辨率导致主干与低序级断裂在地球物理表征方法上有很大差异.主干断裂活动性强,垂向断距大多超过50 m,在地震剖面中构造变形明显,表现为同一时间深度 T_7^4 界面的地震波形差异较大.因此,

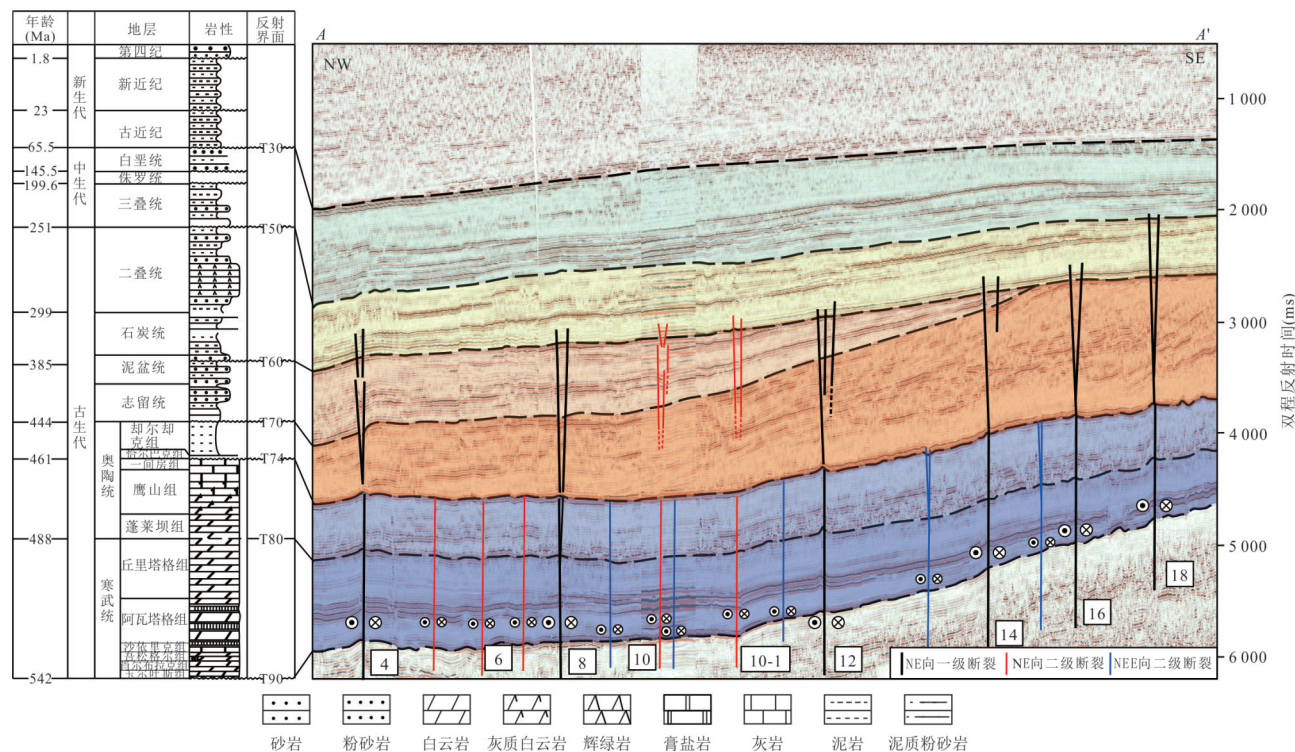


图2 顺北地区构造地层格架(修改自 Qiu *et al.*, 2022)及主干走滑断裂典型构造样式

Fig.2 Stratigraphic column of the Shunbei area with well-seismic tie (modified from Qiu *et al.*, 2022) and structural styles of major strike-slip faults

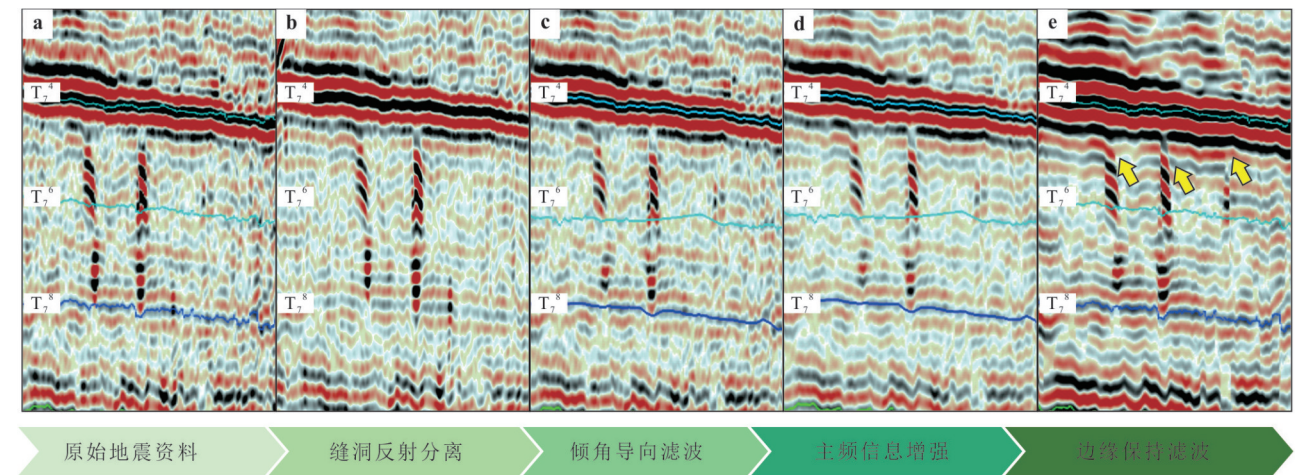


图3 地震增强预处理流程

Fig.3 Seismic enhancement preprocessing workflow

相邻地震道之间的相关性能够准确反映出主干断裂处地震同相轴的横向不连续性,采用沿 T_4 层面的相干或相似性属性即可直接表征主干断裂的平面展布.然而,低序级断裂垂向断距普遍小于30 m,同一时间深度地震波形差异较小,传统的相干或相似属性难以刻画其展布.为此,本文突破传统单一属性预测方法,将地质条件与地震预测相结合,探索

形成了一套“先增强预处理、后分区优选属性”的低序级断裂识别技术序列,初步实现了顺北中东部1.4万 km^2 三维地震的低序级断裂精细预测.

2.1 地震资料增强预处理

低序级断裂在地震剖面中通常表现为连续地震同相轴能量强弱转换的突变点.因此,利用叠后地震资料进行低序级断裂预测的关键是以增强地

震同相轴反射特征变化为目标的地震资料预处理,具体步骤如下(图3)。

(1)缝洞反射分离:基于“串珠状”强反射与背景反射在时间—频率谱特征的差异,利用S变换将地震信号转换到时频域,衰减“串珠状”强反射对应的时频谱能量,使得重构的时空域地震信号中“串珠状”反射与背景反射能量得到平衡,从而有效减弱不连续性属性在“串珠状”反射边缘的强异常。

(2)倾角导向滤波:沙漠地表条件以及奥陶系碳酸盐岩地层内部较小的阻抗差异使得该层段地震信号更容易受到随机噪声的干扰。在地层倾角属性的约束下,采用均值滤波和中值滤波联合压制地震数据中的随机噪声,提升不连续性属性对断裂检测结果的聚焦能力。

(3)主频信息增强:地震有效频宽范围内的地震信号可靠性较强,而且主频范围内的地震数据包含了主要的断裂信息。因此,采用S变换将地震信号转换到时间—频率域,在时频域中,提升地震资料有效频宽范围内的时频谱能量,重构至时空域的地震资料同相轴的连续性得到了有效增强。

(4)边缘保持滤波:清晰的断裂边界可以提高地震属性对断裂刻画的有效性。在一个固定或自适

应的横向窗口内,采用边缘保持滤波算子区分地震信号差异最小及差异最大的点,从而增强低序级断裂发育位置处能量强弱转换的边界,提升不连续性地震属性对断裂边界的刻画能力。

通过上述地震数据预处理步骤,实现非断裂信息逐级衰减和断点信息逐级增强,为地震不连续性属性计算提供了良好的数据基础。

2.2 不连续属性分区优选

对原始地震数据体预处理后,基于塔里木盆地顺北地区中部和东部走滑断裂体系形成的不同地质背景,分别选择针对性的地震属性实现低序级断裂平面展布的精细刻画(图4)。

(1)顺北中部弱挤压区:地层相对平坦,低序级断裂主要表现为地震同相轴里局部能量强弱差异。最大似然属性是相似性属性的指数次幂与1的差值,可以放大相邻地震道间的相关性,有助于凸显断裂检测效果,相比其他不连续性属性有效提升低序级断裂的识别能力。另一方面,最大似然属性也反映某个采样点处断裂发育的可能性,地震同相轴连续性越差或同相轴能量强弱转换边界越清晰,最大似然属性越大,断裂预测越可靠。

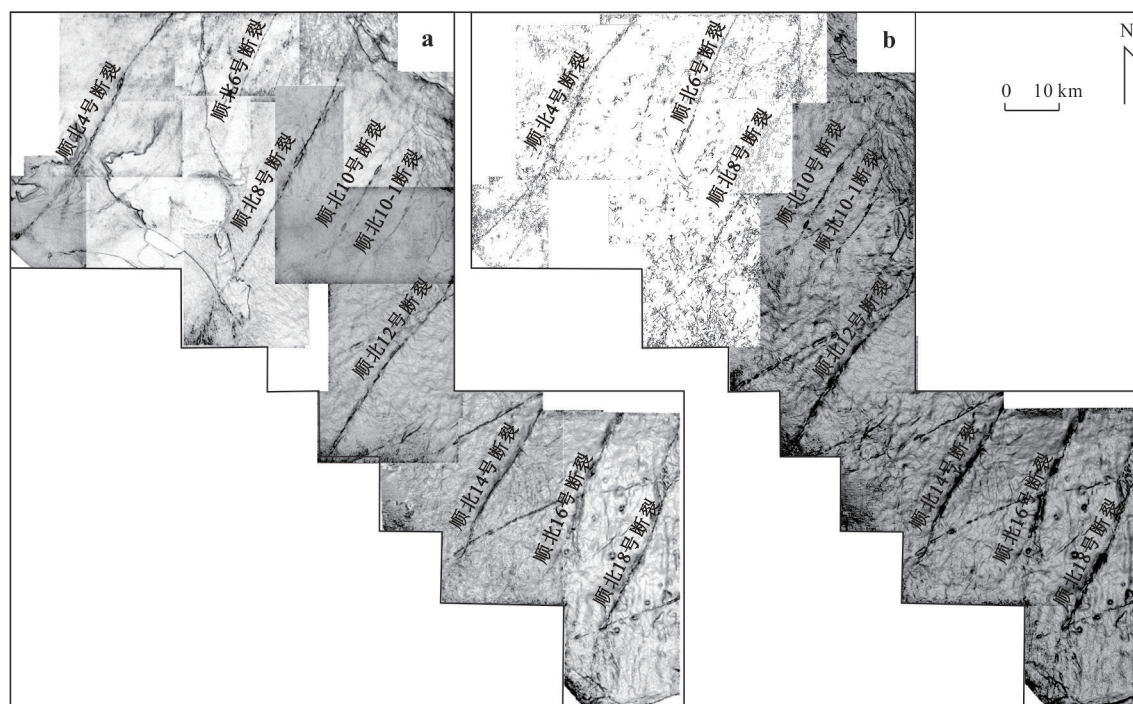


图4 顺北地区中奥陶统碳酸盐岩顶面原始相干属性(a)与分区优选属性(b)对比

Fig.4 Comparison between the original coherent attribute (a) and the zonal preferred attributes (b) of top surface of Middle Ordovician carbonate rocks in the Shunbei area

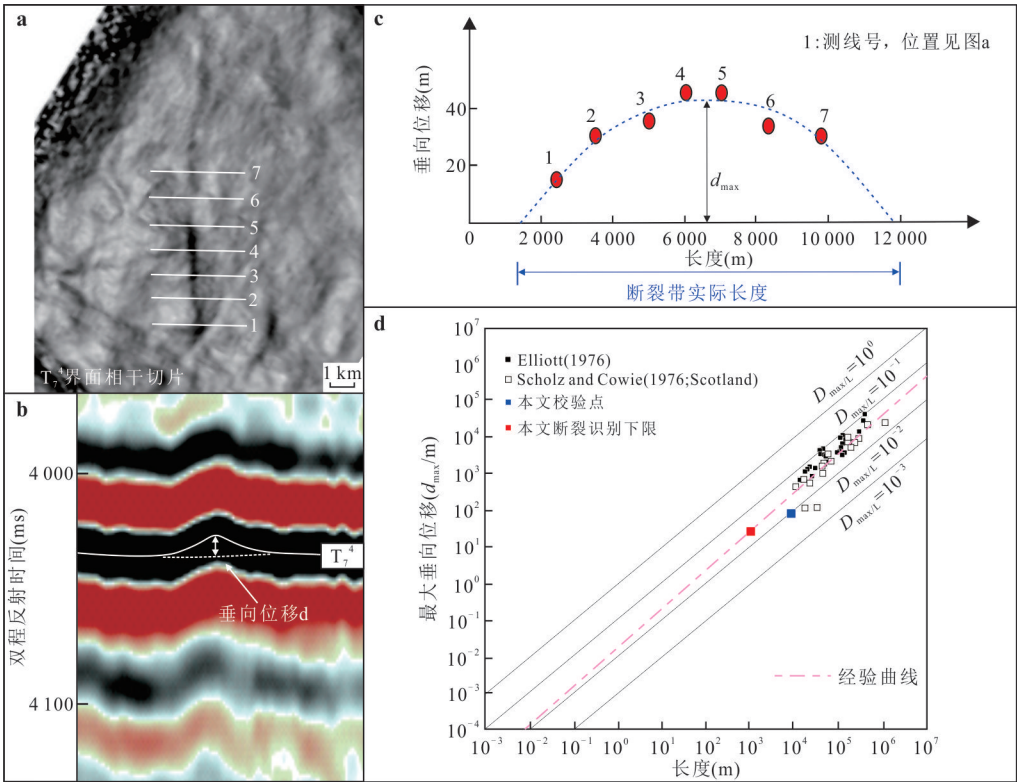


图 5 低序级断裂识别校验及精度确定

Fig.5 Low-order fault identification verification and accuracy determination

图 a、b、c 分别为选取的低序级断裂识别实例的平面展布、垂向剖面和长度推算;图 d 为挤压性质断层长度与最大垂向位移关系,引自文献 Kim and Sanderson(2005)

(2)顺北东部强挤压区:低序级断裂表现微弱的“压脊”构造,平面上为沿断裂走向的局部凸起,剖面上为地震同相轴呈现向上的挠曲.边缘检测属性是空间差分算子与地震沿层属性的空域卷积,在空间窗口内地震沿层属性中某个采样点与其周围样点比较所得差值的加权平均,可以放大地震沿层属性在空间的局部变化,有效增强其中存在的不连续性,可以实现对这类具有挤压性质的低序级断裂的有效表征.

2.3 断裂识别结果校验

基于优选的地震属性,通过人工干预对获得的低序级断裂体系进行校验,去除了火成岩活动或其他原因引起的断裂假象(刘雨晴等,2022),初步落实了低序级断层的展布.在此基础上,本文进一步验证了断裂识别的可靠性、明确了断裂识别的精度.

前人大量研究表明,断裂带的变形幅度具有中间大、两头小的特点,断裂带最大的变形幅度和断裂带长度之间存在线性关系(Kim and Sanderson, 2005).由于低序级断裂两端变形更加微弱难以厘定其长度范围,因此通过沿断裂走向的垂向变形幅度

变化可以推测断裂真实长度(Kim and Sanderson, 2005).以图 5 中断裂为例,断裂带中部最大变形幅度 40 m,向两侧逐步递减至 20 m 左右时断裂特征基本消失(图 5a、5b),根据递减曲线推测断裂真实长度约 11 km(图 5c),吻合于挤压性质断裂经验曲线范围(低序级断裂滑移量小,难以测量,因此无法使用走滑断裂经验曲线;顺北地区低序级断裂形成于挤压背景,具有倾向活动特征,由此可适用于挤压性质断裂曲线),说明了断裂识别的可靠性和科学性(图 5d).其中,20 m 也即为本方法可识别到的垂向变形幅度下限,根据经验曲线推断,对应的最小级别断裂带识别长度约 1 km(图 5d),与本文识别结果基本一致(图 6).

3 低序级断裂展布特征及与成因分类

3.1 体系划分与展布规律

顺北中东部可识别 5 组走向低序级断裂,包括 NE 向、NEE 向、NW 向、近 NS 向和近 EW 向(图 6, 图 7).NE 和 NEE 向低序级断裂数量多,走向范围从 NE20°变化到 NE60°,大部分在主干断裂之间发育,

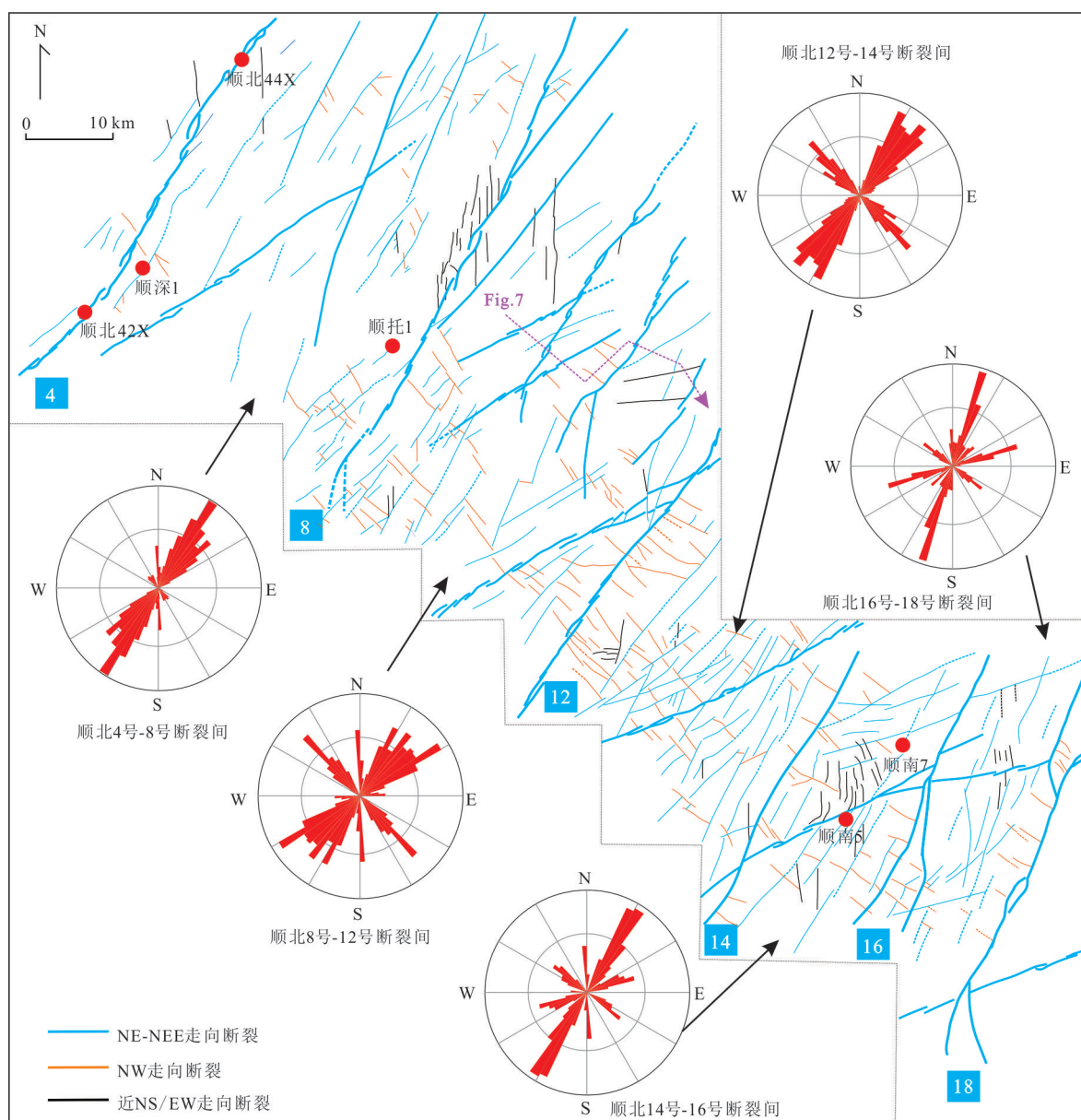


图6 顺北地区中奥陶统碳酸盐岩多序级断裂展布及低序级断裂走向玫瑰花图

Fig.6 Distribution of multi-order fault and trend roses of low-order faults in the Middle Ordovician carbonate rocks of Shunbei area

与主干断裂近平行展布,表现为沿走向直线式断续延伸或阶步式交替延伸,延伸距离长度可达20 km以上,同一级别断裂间距相对均匀;另一部分则在主干断裂带旁侧发育,与主干断裂带成小角度相交,延伸距离有限.NW向低序级断裂数量次之,走向范围在NW30°到NW50°之间,发育于高级别NE或NEE向断裂带旁侧,与NE或NEE向断裂带近垂直或者大角度相交,往往被高级别断裂围限、截切,延伸长度多在5~10 km;在同一围限区域内,NW向断裂间距相对均匀或出现规律性变化.近NS向和近EW向断裂数量较少,发育在断裂带两侧或尾

端,形成典型的羽状或马尾构造,延伸距离在10 km左右.

随着主干断裂带自西向东展布格局发生变化,低序级断裂的优势走向和分布密度也出现变化(图6).在顺北4号带和顺北8号带之间,可识别低序级断裂数量少,多以近平行展布的NE向断裂为主,在主干断裂之间均匀分布,同时发育少量近NS向断裂.在顺北8号带和顺北12号带之间,低序级断裂密度增加、走向增多,NE-NEE向断裂仍占主导地位,同时为北部发育近NS向和近EW向断裂、南部出现大量NW向断裂.在顺北12号带和顺北14号

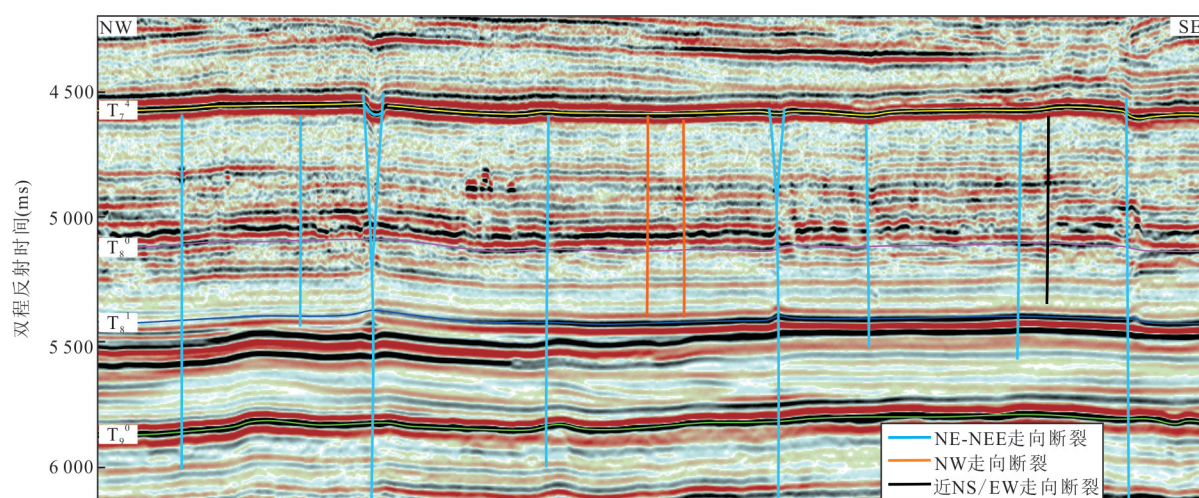


图7 顺北地区低序级断裂典型剖面

Fig.7 Typical profiles of low-order faults in Shunbei area

带之间,低序级断裂密度进一步增加,在顺北12号带东密集发育一系列NW向断裂带,另有大量延伸较远的NE向断裂带密间距分布,多走向断裂组合样式趋于复杂化,呈现网格状交错展布格局.在顺北14号带到顺北16号带之间,NE30°断裂占主导,NE60°和NW、近NS向断裂发育相当,此外在NE向主干断裂与NEE向主干断裂相交而成的锐角区域出现似弧形构造体系.在顺北16号带到顺北18号带之间,以NE向断裂为主、NEE向断裂次之.

3.2 成因模式与差异展布机制

根据低序级断裂与高序级断裂之间的夹角统计,结合野外露头观测,可将顺北地区低序级断裂划分为近平行体系、锐夹角体系和近垂直体系等3种成因类型(图8).

(1) 近平行体系:即在主干断裂带之间发育的一套夹角为0~10°之间体系,与主干走滑断裂形成于统一的区域应力场,同一级别的断裂间距较稳定.从野外观测和地震解析结果来看,主干走滑断裂带往往并非线性延伸(图8c-1、8c-1'),而是呈现多段拼贴的展布特征,可能与其经历了多期活动有关.初期,应力作用于相对均一的块体,形成一系列近平行的、延伸距离短的节理带或者薄弱面;后期,当应力持续推进,仅部分节理带或薄弱面被选择性地活动,随着位移量的增大沿着主位移方向逐渐连接、贯穿形成主干断裂,未发生明显继承性活动的大部分节理带或薄弱面即为低序级断裂.

(2) 锐夹角体系:即与主干断裂带呈30°~40°夹角的分支断裂体系,在主断面两盘沿着滑移方向排列,通常发育在主断面的尾端或者叠接、弯曲等其

他应力集中的部位(图8c-2、8c-2'),可以指示主应力的方向(Kattenhorn, 2004),也被称为马尾构造、羽状破裂等(Cruikshank *et al.*, 1991; Willemse *et al.*, 1997).研究揭示,当主应力与主断面呈45°夹角时,主断面两端才会沿着主滑移方向线性扩展;当主应力小于或者大于45°时,主断面尾端、叠接、弯曲等部位的扩展会出现路径偏离,通过马尾断裂的发育形成最优破裂路径(Du and Aydin, 1995).顺北地区走滑断裂的主要形成期为加里东中期III幕,此时盆地西南缘受到西昆仑造山作用产生的NE向挤压应力、东南缘受到阿尔金造山作用产生的NW向挤压应力,二者合力形成近NS向的挤压作用于NE向断裂上,与NE向断裂形成约30°夹角,由此沿着主断面形成了这套锐夹角体系.

(3) 近垂直体系:即与主干断裂呈80°~90°夹角的分支断裂体系,延伸距离有限、往往被高序级的NE或NEE向近平行体系围限.这套体系类似于构造地质学中的交错节理系(cross joint),在先存节理带之间发育但又不切割先存节理带,往往与先存节理带形成于不同的期次和应力场中,即先存节理带在后期作为力学变形边界约束交错节理系的发育(Bai and Gross, 1999).这种构造在野外露头中可广泛被观察到(图8c-3).近垂直体系的间距往往也具有规律性,与近平行体系组成棋盘格状构造样式,可以极大提高孤立断面间的连通性,因此是一组不可忽视的重要低序级体系.其成因初步推测与深部碳酸盐岩脆性地层中夹有中寒武统韧性膏盐软弱层有关,脆性与韧性的变形方式不同,在韧—脆性过渡位置剪切破裂方式则会出现变化(Scholz and

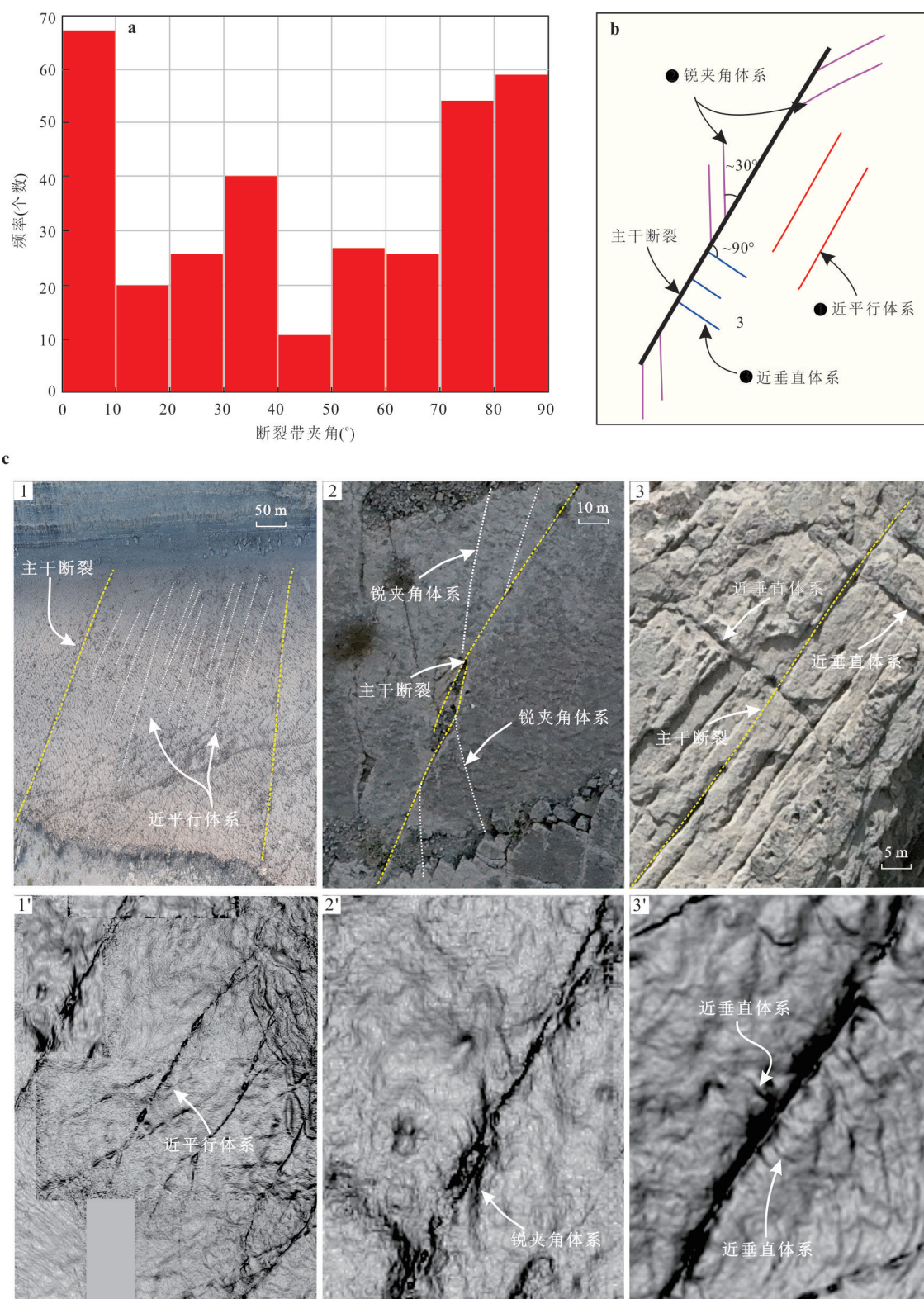


图8 顺北地区低序级断裂与高序级断裂夹角统计(a)、成因模式(b)及柯坪地区野外和地震证据(c)

Fig.8 Statistics of the angle between low-order faults and high-order faults (a), genetic model (b) and evidences from fields and seismics

Cowie, 1990; Scholz and Choi, 2022), 详细机理有待进一步研究.

总体而言,顺北地区低序级断裂自西向东由“等间距、单走向、近平行式”展布向“密间距、多走

向、网格式”展布变化.低序级断裂展布样式的变化与区域应力场分布有关.古生代以来,塔里木盆地发生多期造山作用,挤压应力从盆地边缘向盆地腹部进行传递.在盆地腹部区域挤压应力弱,通过少量断裂活动即可释放大量应力,因此断裂带间距大、发育稀疏、挤压变形弱.而靠近盆缘区域应力增强,需要通过高密度断裂带发育才可释放应力,因此断裂带间距小、发育密集、挤压变形强.同时,因为断裂带间距减小,走向位移活动引起两条断裂间块体旋转、局部应力增强,进一步诱发低序级断裂发育.

4 低序级断裂与主干断裂控储—控藏特征差异

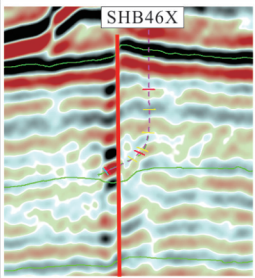
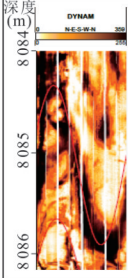
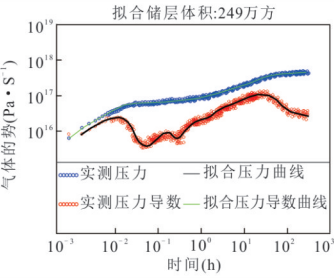
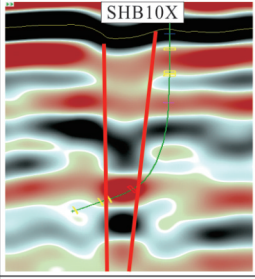
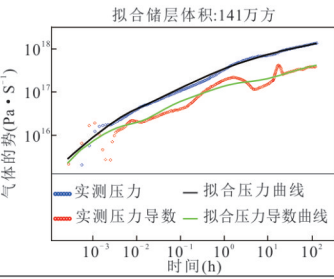
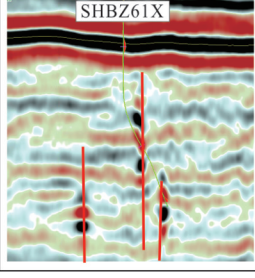
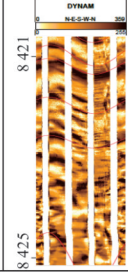
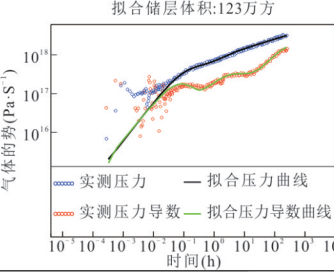
4.1 储集体结构及规模差异

前人已对碳酸盐岩走滑断裂带内部结构开展了系统研究,揭示了致密碳酸盐岩断控储集体发育

“缝、洞”二元结构(云露和朱秀香,2022;李映涛等,2023;罗群等,2023;邓尚等,2024;王清华等,2024;张继标等,2024).近期,随着顺北油气田走滑断控缝洞型油气藏勘探实践不断深入,不同序级断裂带内部储集体结构和规模呈现规律有序的变化.本文通过典型钻井的测井、试井、岩芯等动、静态实物资料(表1,图9),刻画了不同级别断裂带内部储集体结构和规模差异,建立了多序级断控储集体演化序列,明确了“高序级滑动破碎成洞、沿主干带状展布,低序级剪切破裂成缝、多组系网状发育”的断控成储模式.

(1)主干I级断裂带:钻揭完整的“破碎角砾空腔+裂缝带”核带结构,呈多组栅簇状发育样式,其中断层核部以破碎角砾岩相为主,角砾之间的空腔为洞穴型储集空间、物性最好,核部两侧为裂缝带.其中,代表空腔(洞穴)的I类储层厚度最厚可达10余m,占整个储层厚度约为23%(图9a).钻井在核部往往出现规模放空漏失现象,如位于顺北4号断

表 1 已钻揭多序级断裂内部储集体规模统计
Table 1 Statistics of the internal reservoir size of the drilled multi-order faults

序级	地震反射特征	放空与漏失			成像测井及岩石学特征	压力恢复曲线特征及拟合储层体积
		放空(m)	漏失量(m ³)	泥浆密度(g/cm ³)		
主干 I 级		10.5	2 677.06	1.18~1.14		
主干 II 级		2.0	730.83	2.0~1.31		
III 级断裂带		/	58	1.62		

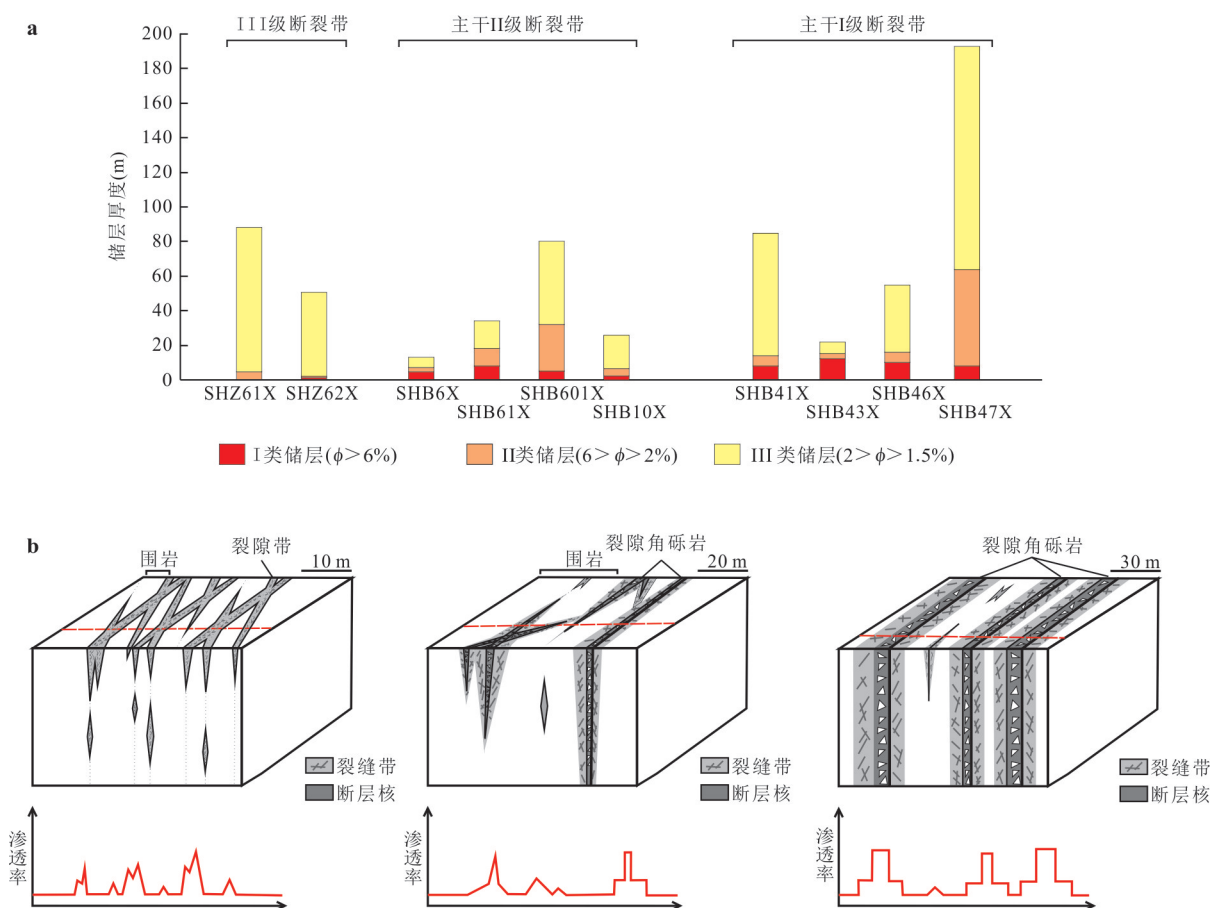


图9 顺北多序级断控储层规模差异(a)及演化过程(b)

Fig.9 Differences among the size of reservoirs controlled by multi-order faults (a) and their evolution process (b)

裂带上的顺北46X,在断面处钻井液漏失量约为2 677.06 g/cm³、放空累计厚度可达10.5 m,压恢曲线拟合储集体体积约249万方(表1)。从压恢双对数曲线形态可以发现,井储阶段后压力导数曲线表现出多段下凹,即径向流特征;后期则表现出典型1/2斜率线性流,综合指示出该井先后沟通多套缝洞储集结构。

(2)主干II级断裂带:仍可钻揭完整的“破碎角砾空腔+裂缝带”核带结构,但“核带”钻遇频率、宽度相较主干I级断裂带明显降低,储集体结构上则表现为空腔占比降低、裂缝带占比增加的趋势。其中,顺北10号断裂带上的SHB10X井,钻井液漏失量达730.83 g/cm³,放空累计厚度为2 m,压恢曲线拟合储集体体积约141万方(表1)。压恢试井双对数曲线主体呈现1/2斜率线性流特征,压力导数曲线局部出现下凹,指示出该井钻揭核一带结构规模相较于主干I级断裂带有所差异,储集体以裂缝带为主,局部发育空腔、洞穴。

(3)III级断裂带(低序级断裂):通常不发育完

整的核带结构,表现为多组系裂缝带发育规律,缺少大套角砾破碎带以及角砾空腔。裂缝带层段多以III类储层为主,整体平均占比可达总储集体厚度的89.4%(图9a)。例如,位于顺北6-1号断裂带上的顺中61X过断面漏失钻井液仅为58 g/cm³、无放空现象,压恢曲线拟合储集体体积约123万方,揭示储层规模相对较小(表1)。此外,压恢试井双对数曲线主要展示出1/2斜率线性流特征,压力导数曲线局部有一定下凹,表明该井储集体以裂缝带为主,局部发育小规模空腔、洞穴;同时,压恢双对数曲线在末期呈现出“闭合”特征,表明远井地带物性迅速变差,压力波及边界,储集体定容封闭。

综上所述,低序级断裂带内部以裂缝带和低演化阶段的断层核为主,组成裂缝占比高的少组系栅簇状储集结构;随着断裂级别的增加(即活动强度增大、演化程度增高),断裂破碎规模逐渐增大,储集结构逐渐呈多组系栅簇状发育样式,其中断层核部以裂隙角砾岩、角砾空腔等岩相为主,由致密围岩向断裂核部储集物性呈逐渐增大的趋势(图9)。

表 2 低序级断裂与主干断裂带钻井油气藏特征对比

Table 2 Comparison of the characteristics of drilled oil and gas reservoirs between the low-order faults and the major faults

断裂级别	钻井	生产层位	气油比 (m ³ /m ³)	压力 系数	测试日产油 (m ³)	测试日产气 (10 ⁴ m ³)	单位压降产能 (t/MPa)
低序级 断裂	顺北 21X	O ₂ yj-O ₁₋₂ y	1 3350	2.01	1.94	2.59	292
	顺深 1X	O ₁₋₂ y	1 3807	2.03	46.31	63.94	2 230
	富东 1	O ₂ yj-O ₁₋₂ y	1 8925	2.1	21.4	40.5	—
	顺托 1	O ₂ yj-O ₁₋₂ y	9349	1.6	2.15	2.01	—
	顺南 7	O ₁₋₂ y-O ₁ p	气藏	1.48	—	12.29	—
	顺南 5	O ₁₋₂ y-O ₁ p	气藏	1.65	—	—	—
主干	顺北 44X	O ₁₋₂ y	547	1.17	1 036.8	56.76	18 332
断裂	顺北 42X	O ₂ yj-O ₁₋₂ y	2 550	1.17	322.32	82.18	4 444.65

注:表中部分数据引自王清华等(2023);钻井位置见图 1、图 6。

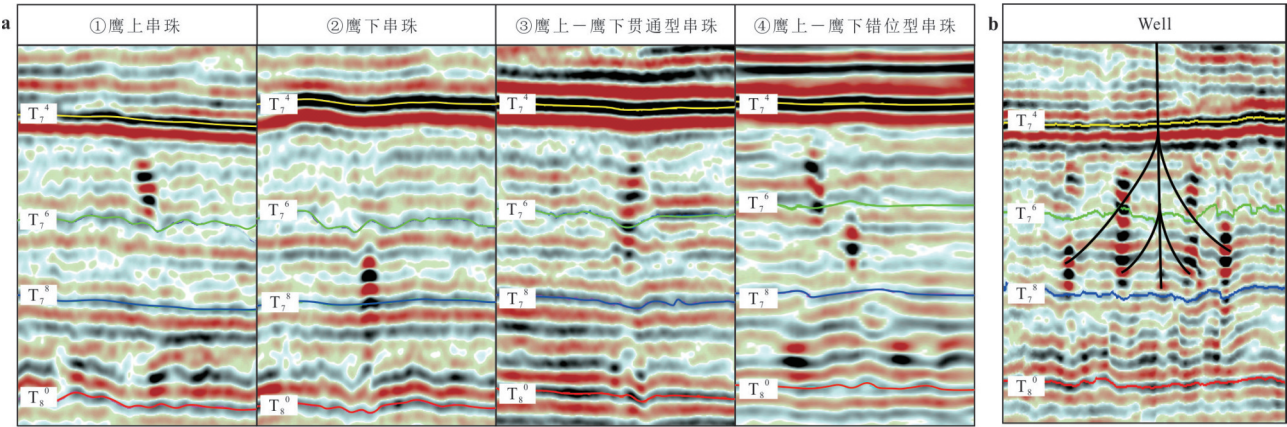


图 10 “串珠”分类(a)和一井多靶目标剖面(b,目标位置见图 10d)

Fig.10 "String beads" classification (a) and multi-target profile of one well (b, see Fig.10d for location)

4.2 油气藏特征差异

与主干断裂带控制的常压油气藏体系不同(压力系数在 1.0 左右)(彭威龙等, 2023; 彭威龙等, 2024),低序级断控油气藏具有典型超压特征(压力系数在 1.5~2.0)(表 2)。圈闭自封闭性强和烃类裂解是低序级断裂带上形成超压油气藏系统的主要原因(王存武, 2008; 曾帅等, 2023)。由于低序级断裂以早期活动为主且活动弱,形成以裂缝型为主的储层,规模相对小、连通性差,早期充注的原油因断裂后期不再活动而无法动态调整,随着埋深增加、温度增大,原油在封闭性强的圈闭中裂解生气导致压力增高。顺北低序级断裂带控制的油气藏气油比普遍比较高可佐证这一观点,例如顺北 21X 和顺深 1X 储层气油比都超过 10 000 m³/m³。而主干断裂带上(顺北 4 号断裂带)钻井气油比相对低,这是由于主干断裂具有多期活动且活动强,形成的洞—缝型储层规模大且连通性好,油气可多期充注且在空间上进行动态调

整,使得油气藏压力始终保持在常压水平。

5 低序级断控油气藏勘探评价与部署思路

通过上述低序级断裂相关的储集体和油气藏特征解剖可知,单井钻揭的低序级断控储集体规模与内部连通性劣于主干断裂。因此,寻找规模储集体目标对于低序级断控领域部署至关重要。研究发现,主干断裂之间离散分布的“串珠”是低序级相关储层的地震响应特征。本文基于人工识别和大数据分析,结合断裂解析,形成了低序级相关规模储集体,即串珠体目标优选思路和方法。

首先,建立了针对离散分布串珠的分类部署思路。这些“串珠”在勘探目的层奥陶系鹰上段和鹰下段分层展布,其中鹰上段发育 996 个、鹰下段发育 1 794 个,表现为上少下多的特点。根据串珠的发育

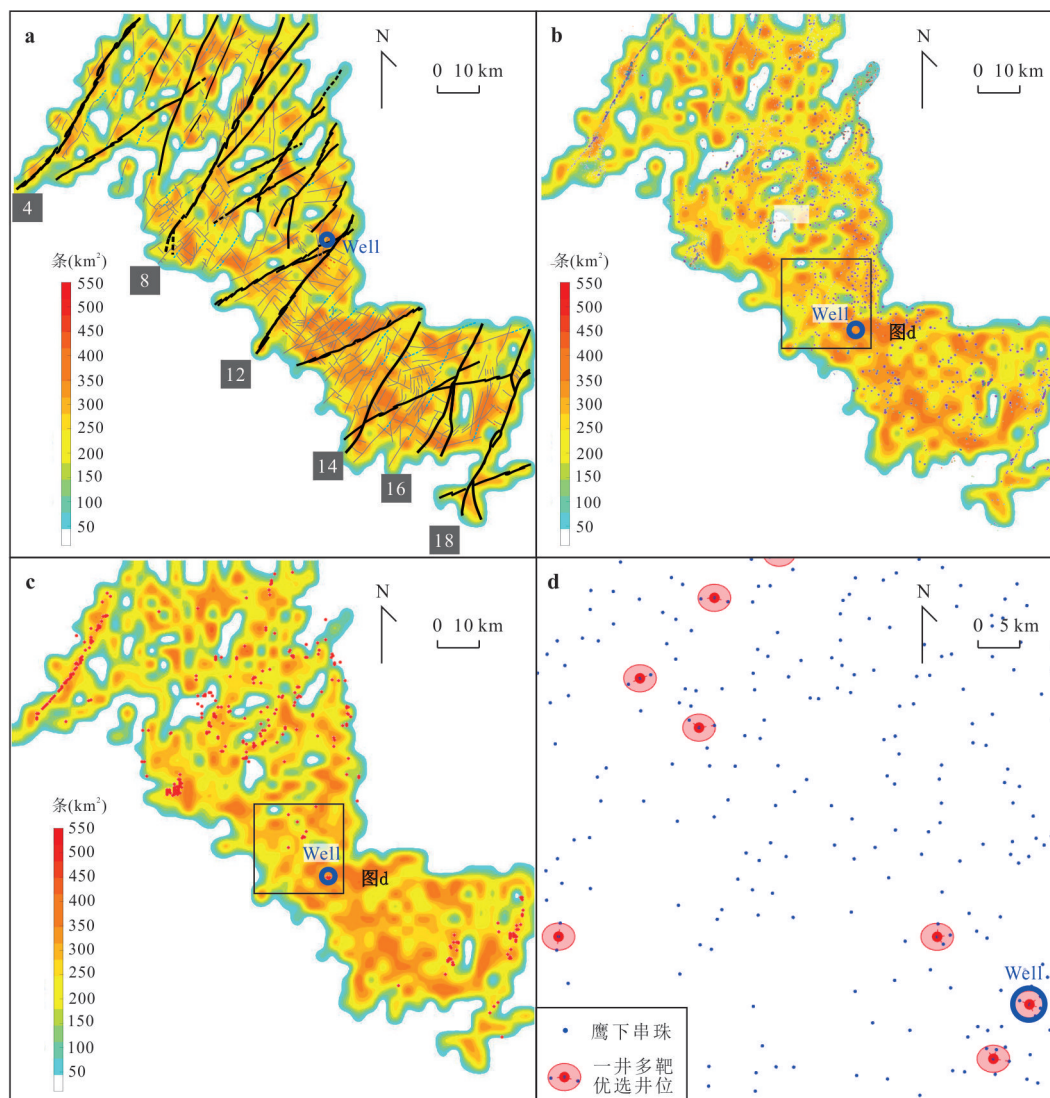


图11 低序级断裂密度(a)及其与鹰下段串珠、鹰上一鹰下贯通型串珠叠合(b,c)和一井多靶目标设计(d)

Fig.11 Low-order fracture density (a) and its superposition with the beads of the lower Yingshan strata, the upper and lower eagle through beads (b, c) and the design of multi-target in one well (d)

层位和垂向位置关系,可将目的层串珠划分为4类:鹰上段串珠、鹰下段串珠、鹰上一鹰下贯通型串珠、鹰上一鹰下错位型串珠(图10a)。(1)优选低序级断裂高密度区鹰下段串珠。虽然单条低序级断裂控储规模有限,但低序级断裂通常成组系发育,断裂发育密集区地层破碎严重,是规模储集体的优势发育位置,因此优选低序级断裂高密度区鹰下段串珠进行部署,基于低序级断裂解析结果计算断裂分布密度(图11a),进而叠合鹰下段串珠分布来筛选出高密度区的串珠分布(图11b)。(2)优选鹰上一鹰下贯通型串珠。顺深1井的高产突破揭示了鹰上一鹰下段贯穿的串珠为纵向上发育的多套储集体,通过大数据分析鹰上段、鹰下段串珠坐标,设定平面最小

距离阈值,筛选出全部贯穿型串珠的平面坐标分布,优选此类贯通型串珠进行部署(图11c)。

其次,低序级断控领域部署需考虑地质工程一体化。通过单个井眼兼探尽可能多的串珠目标,以实现一井多靶、高效动用的目的。根据当前钻井工程技术设置单井控制范围(顺北地区钻井水平段在2 km以内,因此将范围阈值设定为2 km)。采用类贪心思想策略,基于串珠坐标信息计算得到最优的井眼坐标,使其能够覆盖最多串珠目标的坐标信息,并逐步逼近整体最优解。以鹰下段串珠为例,设定预部署井眼数量10口,单井覆盖范围半径设定为2 000 m,优选出10个一井多靶优势井眼坐标,其中单个井眼覆盖目标最多为6个目标、最少为3个。图

10b、图 11d 中展示了在低序级断裂高密度区,通过计算优选的一井多靶优势井眼坐标,单个井眼覆盖 5 个串珠,包括两个上下贯通型串珠和 3 个鹰下段串珠。

此外,要加强寻找断—相—溶三因素耦合控制的储集体目标。仅靠断裂破碎形成的储集体平面上呈条带状展布,始终难以面上展开。而近期,富东 1 等钻井突破带来重要启示(王清华等,2023),低序级断裂破碎通过叠加高能相带和层序界面岩溶作用,可以形成横向连通性好的规模储层。因此,接下来应当加强研究区碳酸盐岩台内沉积相带精细刻画和关键层序界面暴露溶蚀作用分析,明确多因素耦合控储机制,厘定低序级相关多类型规模储集体分布规律。

6 结论

(1)突破传统单一属性预测方法,将地质条件与地震预测相结合,探索形成了一套“先增强预处理、后分区优选属性”的低序级断裂识别技术序列,在中部弱挤压区采用最大似然属性,在东部挤压区采用边缘检测属性,将低序级断裂带识别长度精度提高至 1 km。

(2)顺北中东部发育 NE 向、NEE 向、NW 向、近 NS 向和近 EW 向等 5 组走向低序级断裂,自西向东由“等间距、单走向、近平行式”展布向“密间距、多走向、网格式”展布变化,可划分为近平行体系、锐夹角体系和近垂直体系等 3 种成因类型。

(3)低序级断裂内部通常不发育完整的核带结构,由多组系裂缝带组成,缺少大套角砾破碎带以及角砾空腔,储集体较主干断裂规模小、连通性弱,呈定容封闭特征,易形成超压油气藏系统。

(4)寻找规模储集体目标对于低序级断控领域部署至关重要。优选上下贯通型串珠和低序级断裂高密度区的鹰下段串珠进行部署;同时需考虑地质工程一体化,基于贪心算法进行一井多靶井型设计。

References

- An, H. T., Li, H. Y., Wang, J. Z., et al., 2009. Tectonic Evolution and Its Controlling on Oil and Gas Accumulation in the Northern Tarim Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1):142—147(in Chinese with English abstract).
- Bai, T. X., Gross, M. R., 1999. Theoretical Analysis of Cross-Joint Geometries and Their Classification. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B1): 1163—1177. <https://doi.org/10.1029/1998jb900044>
- Cao, Z. C., Yun, L., Qi, L. X., et al., 2024. A Major Discovery of Hydrocarbon-Bearing Layers over 1 000-Meter Thick in Well Shunbei 84X, Shunbei Area, Tarim Basin and Its Implications. *Oil & Gas Geology*, 45(2):341—356(in Chinese with English abstract).
- Chen, H. H., 2023. Advances on Relationship between Strike-Slip Structures and Hydrocarbon Accumulations in Large Superimposed Craton Basins, China. *Earth Science*, 48(6): 2039—2066(in Chinese with English abstract).
- Cruikshank, K. M., Zhao, G. Z., Johnson, A. M., 1991. Analysis of Minor Fractures Associated with Joints and Faulted Joints. *Journal of Structural Geology*, 13(8): 865—886. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90083-u](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90083-u)
- Deng, S., Li, H. L., Zhang, Z. P., et al., 2018. Characteristics of Differential Activities in Major Strike-Slip Fault Zones and Their Control on Hydrocarbon Enrichment in Shunbei Area and Its Surroundings, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 878—888(in Chinese with English abstract).
- Deng, S., Li, H. L., Zhang, Z. P., et al., 2019. Structural Characterization of Intracratonic Strike-Slip Faults in the Central Tarim Basin. *AAPG Bulletin*, 103(1): 109—137. <https://doi.org/10.1306/06071817354>
- Deng, S., Liu, Y. Q., Liu, J., et al., 2021. Structural Styles and Evolution Models of Intracratonic Strike-Slip Faults and the Implications for Reservoir Exploration and Appraisal: A Case Study of the Shunbei Area, Tarim Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(6): 1111—1126(in Chinese with English abstract).
- Deng, S., Qiu, H. B., Liu, D. W., et al., 2024. Advances in Research on the Genetic Mechanisms of Intracratonic Strike-Slip Fault System and Their Control on Hydrocarbon Accumulation: A Case Study of the Northern Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(5): 1211—1225(in Chinese with English abstract).
- Deng, S., Zhao, R., Kong, Q. F., et al., 2022. Two Distinct Strike-Slip Fault Networks in the Shunbei Area and Its Surroundings, Tarim Basin: Hydrocarbon Accumulation, Distribution, and Controlling Factors. *AAPG Bulletin*, 106(1):77—102. <https://doi.org/10.1306/07202119113>
- Du, Y. J., Aydin, A., 1995. Shear Fracture Patterns and Connectivity at Geometric Complexities along Strike-Slip Faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9):18093—18102. <https://doi.org/10.1029/95jb01574>
- He, D. F., Zhou, X. Y., Yang, H. J., et al., 2008. Formation

- Mechanism and Tectonic Types of Intracratonic Paleouplifts in the Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 15(2):207—221(in Chinese with English abstract).
- He, S. G., Deng, S., Liu, Y. Q., et al., 2023. New Structural Style of Spatial Architecture and Derived Structure of Intracratonic Strike-Slip Faults: A Case Study of Shunbei No. 12 Fault, Tarim Basin. *Earth Science*, 48(6): 2136—2150(in Chinese with English abstract).
- Kattenhorn, S. A., 2004. Strike-Slip Fault Evolution on Europa: Evidence from Tailcrack Geometries. *Icarus*, 172(2): 582—602. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.07.005>
- Kim, Y. S., Sanderson, D. J., 2005. The Relationship between Displacement and Length of Faults: A Review. *Earth Science Reviews*, 68(3—4): 317—334. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.003>
- Li, Y. T., Deng, S., Zhang, J. B., et al., 2023. Fault Zone Architecture of Strike-Slip Faults in Deep, Tight Carbonates and Development of Reservoir Clusters under Fault Control: A Case Study in Shunbei, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(6):80—94(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Deng, S., 2022. Structural Analysis of Intraplate Strike-Slip Faults with Small to Medium Displacement: A Case Study of the Shunbei 4 Fault, Tarim Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(1): 124—136(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Deng, S., Zhang, J. B., et al., 2023. Characteristics and Formation Mechanism of the Strike-Slip Fault Networks in the Shunbei Area and the Surroundings, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(6):95—109(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Deng, S., Zhang, R., et al., 2022. Characterization and Petroleum Geological Significance of Deep Igneous Intrusions and Related Structures in the Shunbei Area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(1):105—117(in Chinese with English abstract).
- Luo, Q., Wang, Q. J., Yang, W., et al., 2023. Internal Structural Units, Differential Characteristics of Permeability and Their Transport, Shielding and Reservoir Control Modes of Strike-Slip Faults. *Earth Science*, 48(6):2342—2360(in Chinese with English abstract).
- Peng, W. L., Deng, S., Zhang, J. B., et al., 2024. Genetic Mechanism and Main Controlling Factors of Deep Marine Condensate Reservoirs: A Case Study of the Shunbei No. 4 Fault Zone in Tarim Basin, NW China. *Natural Gas Geoscience*, 35(5):838—850(in Chinese with English abstract).
- Peng, W. L., Lin, H. X., Liu, Q. Y., et al., 2023. Geochemical Characteristics of Helium and Favorable Exploration Areas in the Tarim Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 34(4):576—586(in Chinese with English abstract).
- Qi, L. X., 2020. Characteristics and Inspiration of Ultra-Deep Fault-Karst Reservoir in the Shunbei Area of the Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(1): 102—111(in Chinese with English abstract).
- Qiu, H. B., Deng, S., Zhang, J. B., et al., 2022. The Evolution of a Strike-Slip Fault Network in the Guchengxu High, Tarim Basin (NW China). *Marine and Petroleum Geology*, 140: 105655. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105655>
- Scholz, C. H., Choi, E., 2022. What Comes First: The Fault or the Ductile Shear Zone? *Earth and Planetary Science Letters*, 577: 117273. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117273>
- Scholz, C. H., Cowie, P. A., 1990. Determination of Total Strain from Faulting Using Slip Measurements. *Nature*, 346:837—839. <https://doi.org/10.1038/346837a0>
- Tang, D. Q., Chen, H. H., Geng, F., et al., 2023. Characteristics of Intraplate Small-Displacement Strike-Slip Faults: A Case Study of Tarim, Sichuan and Ordos Basins. *Earth Science*, 48(6):2067—2086(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. W., 2008. Study on the Overpressure Development, Evolution and Origin Mechanism in the Carbonate Reservoir of the Northeast Area, Sichuan Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. H., Cai, Z. Z., Zhang, Y. T., et al., 2024. Research Progress and Trend of Ultra-Deep Strike-Slip Fault-Controlled Hydrocarbon Reservoirs in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 45(4):379—386(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. H., Yang, H. J., Zhang, Y. T., et al., 2023. Great Discovery and Its Significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(1):47—58(in Chinese with English abstract).
- Willemse, E. J. M., Peacock, D. C. P., Aydin, A., 1997. Nucleation and Growth of Strike-Slip Faults in Limestones from Somerset, U.K. *Journal of Structural Geology*, 19(12): 1461—1477. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(97\)00056-4](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(97)00056-4)
- Yun, L., 2021. Controlling Effect of NE Strike-Slip Fault System on Reservoir Development and Hydrocarbon Accumulation in the Eastern Shunbei Area and Its Geological Significance, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*

- tion, 26(3):41—52(in Chinese with English abstract).
- Yun, L., Deng, S., 2022. 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. *Acta Petrolei Sinica*, 43(6): 770—787(in Chinese with English abstract).
- Yun, L., Zhu, X.X., 2022. A New Trap Type: Fault-Controlled Fracture-Vuggy Trap. *Oil & Gas Geology*, 43(1):34—42 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, S., Qiu, N.S., Li, H.L., et al., 2023. Differential Overpressure Distribution in Ordovician Carbonates, Shuntuoguole Area, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(6):305—315(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.B., Deng, S., Han, J., et al., 2024. Study on Development Mechanism and Variability of Strike-Slip Fault-Controlled Reservoirs Regulated by Multi-Stage Structural Stress: A Case Study of the Shunbei Area, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(4):775—785 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 安海亭, 李海银, 王建忠, 等, 2009. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制. *大地构造与成矿学*, 33(1): 142—147.
- 曹自成, 云露, 漆立新, 等, 2024. 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. *石油与天然气地质*, 45(2):341—356.
- 陈红汉, 2023. 我国大型克拉通叠合盆地的走滑构造与油气聚集研究进展. *地球科学*, 48(6):2039—2066.
- 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等, 2018. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系. *石油与天然气地质*, 39(5):878—888.
- 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等, 2021. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例. *大地构造与成矿学*, 45(6):1111—1126.
- 邓尚, 邱华标, 刘大卫, 等, 2024. 克拉通内走滑断裂成因与控藏机制研究进展: 以塔里木盆地北部为例. *石油与天然气地质*, 45(5):1211—1225.
- 何登发, 周新源, 杨海军, 等, 2008. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型. *地学前缘*, 15(2):207—221.
- 何松高, 邓尚, 刘雨晴, 等, 2023. 克拉通内走滑断裂空间结构及派生构造新样式: 以塔里木盆地顺北 12 号断裂为例. *地球科学*, 48(6):2136—2150.
- 李映涛, 邓尚, 张继标, 等, 2023. 深层致密碳酸盐岩走滑断裂带核带结构与断控储集体簇状发育模式: 以塔里木盆地顺北 4 号断裂带为例. *地学前缘*, 30(6):80—94.
- 刘雨晴, 邓尚, 2022. 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. *中国矿业大学学报*, 51(1):124—136.
- 刘雨晴, 邓尚, 张继标, 等, 2023. 塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系差异发育特征及成因机制探讨. *地学前缘*, 30(6):95—109.
- 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等, 2022. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例. *石油与天然气地质*, 43(1):105—117.
- 罗群, 王千军, 杨威, 等, 2023. 走滑断裂内部结构渗透差异特征及其输导控藏模式. *地球科学*, 48(6):2342—2360.
- 彭威龙, 邓尚, 张继标, 等, 2024. 深层海相凝析油气藏成因机制与富集主控因素: 以塔里木盆地顺北 4 号断裂带为例. *天然气地球科学*, 35(5):838—850.
- 彭威龙, 林会喜, 刘全有, 等, 2023. 塔里木盆地氦气地球化学特征及有利勘探区. *天然气地球科学*, 34(4):576—586.
- 漆立新, 2020. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示. *中国石油勘探*, 25(1):102—111.
- 唐大卿, 陈红汉, 耿锋, 等, 2023. 板内小位移走滑断裂特征解析: 以塔里木、四川及鄂尔多斯盆地为例. *地球科学*, 48(6):2067—2086.
- 王存武, 2008. 川东北地区碳酸盐岩层系超压发育演化与成因机制(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 王清华, 蔡振忠, 张银涛, 等, 2024. 塔里木盆地超深层走滑断控油气藏研究进展与趋势. *新疆石油地质*, 45(4): 379—386.
- 王清华, 杨海军, 张银涛, 等, 2023. 塔里木盆地富满油田富东 1 井奥陶系重大发现及意义. *中国石油勘探*, 28(1): 47—58.
- 云露, 2021. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义. *中国石油勘探*, 26(3):41—52.
- 云露, 邓尚, 2022. 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. *石油学报*, 43(6): 770—787.
- 云露, 朱秀香, 2022. 一种新型圈闭: 断控缝洞型圈闭. *石油与天然气地质*, 43(1):34—42.
- 曾帅, 邱楠生, 李慧莉, 等, 2023. 塔里木盆地顺托果勒地区奥陶系碳酸盐岩超压差异分布研究. *地学前缘*, 30(6): 305—315.
- 张继标, 邓尚, 韩俊, 等, 2024. 多期构造应力控制走滑断控储层发育机理与差异性研究: 以塔里木盆地顺北地区为例. *石油实验地质*, 46(4):775—785.