

中国中西部三大克拉通内部走滑断裂分层规律与油气地质作用

刘永涛^{1*} 刘新社² 裴文瑞¹ 李鹏飞² 陈平¹ 张建伍² 韩伟¹ 冯许魁¹ 周义军¹ 沈亚¹

刘勇¹ 王贵重¹ 王志勇¹ 李幸运¹ 刘池洋³ 黄雷³ 张涛¹ 张洁¹

(1 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北 涿州, 072750; 2 中国石油天然气集团公司长庆油田公司, 陕西 西安 710018; 3 西北大学大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 克拉通内部走滑断裂普遍发育已被勘探证实, 且围绕走滑断裂带勘探相继发现了顺北、富满油田。近年来, 随着三维地震的规模实施和深入应用, 走滑断裂沿纵向分层这一鲜明特色也被逐渐证实, 这对于深化克拉通盆地基础地质理论、开拓油气勘探四新领域意义重大。本文以我国中西部塔里木、四川和鄂尔多斯盆地为研究对象, 针对走滑断裂纵向分层的科学问题, 通过广泛调研、横向对比、综合论证的方法, 系统总结走滑断裂纵向分层的发育规律、成因机制及油气地质作用, 取得了 5 个方面的重要进展。

(1) 走滑断裂分层特征仅限于克拉通叠合盆地内部的局部地区, 并不具有区域性的特点, 在塔里木盆地塔北-塔中地区、四川盆地川中地区和鄂尔多斯盆地的西南部表现明显; (2) 走滑断裂分层在三大克拉通叠合盆地内部具有四大表现形式, 即①大型的区域性整合面是走滑断裂纵向分层的主要分界面; ②在不同构造层之间走滑断裂具有同一走向叠置和不同走向叠置两种方式; ③在同一构造层内部走滑断裂纵向上并不一定完全贯穿, 其间可发育一定厚度的间隔层; ④走滑断裂分层特征并不完全受控于基底断裂的控制; (3) 将走滑断裂分层特征划分为不同构造层之间的分层和同一构造层内部的分层两种类型。在塔北-塔中地区、川中地区和鄂尔多斯盆地西南部, 前种类型走滑断裂的分层分别具有“双层”、“三层”和“四层”结构, 后种类型的走滑断裂并不完全贯穿某一构造层, 而是分别表现为上奥陶统、下寒武统、石炭-二叠系及下三叠统内断裂不发育, 构成走滑断裂在纵向上的重要间隔层; (4) 走滑断裂分层受稳定基底、厚盖层、挤压应力三大条件共同控制, 不同构造层之间的断裂分层主要受控于不同期次的区域应力场, 同一构造层内部的断裂分层主要受控于同一期次构造应力的向下衰减和深部构造环境的变化; (5) 走滑断裂分层规律不仅证实了克拉通叠合盆地内部确实存在区域上的纵向构造解耦, 而且有助于理解克拉通内油气纵向分层、上下独立成藏的深层根源。目前, 在鄂尔多斯盆地内部证实走滑断裂向下收敛的分层位置钻井液往往漏失最为严重, 这可为钻井方案设定及过程工程预警提供重要的理论支撑。

关键词: 走滑断裂; 克拉通; 叠合盆地; 分层; 基底; 塔里木盆地; 四川盆地; 鄂尔多斯盆地; 油气勘探; 钻井工程

基金项目: 国家重大科技专项“鄂尔多斯盆地全油气系统与新领域勘探技术”(2025ZD1400201)项目、中国石油东方地球物理公司油气勘探新领域综合研究项目、中国石油天然气股份有限公司长庆油田公司科技项目“长庆油田分公司勘探开发研究 2024 年鄂尔多斯盆地地下古生界断裂体系分布研究”(2025-N/G-1197)项目联合资助

作者简介: 刘永涛(1981-), 男, 高级工程师, 博士, 从事地震资料解释及物探资料综合研究, 主要从事地震地质综合研究及油气勘探相关工作。E-mail: liuyongtaobgp2009@163.com. ORCID: 0009-0006-9028-0334

Stratification Patterns and Petroleum Geological Significance of Intra-Cratonic Strike-Slip Faults in the Major Basins of Central-Western China

Yongtao Liu^{1*}, Xinshe Liu², Wenrui Pei¹, Pengfei Li², Ping Chen¹, Jianwu Zhang², Wei Han¹, Xukui Feng¹, Yijun Zhou¹, Ya Shen¹,

Yong Liu¹, Guizhong Wang¹, Zhiyong Wang¹, Xingyun Li¹, Chiyang Liu³, Lei Huang³, Tao Zhang¹, Jie Zhang¹

1) *CNPC Geophysical Company Limited, Zhuozhou, Hebei, 072750, China;*

2) *PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;*

3) *State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;*

Abstract: The widespread development of intra-cratonic strike-slip faults has been confirmed by exploration activities, with successive major discoveries such as the Shunbei and Fuman oilfields along these fault zones. In recent years, the extensive acquisition and in-depth application of 3D seismic data have further substantiated the distinct characteristic of vertical stratification along strike-slip faults. This recognition holds significant implications for advancing fundamental geological theories of cratonic basins and for pioneering novel domains in hydrocarbon exploration. This study focuses on the Tarim, Sichuan, and Ordos Basins in central-western China. Addressing the scientific question regarding the vertical stratification of strike-slip faults, it systematically synthesizes developmental patterns, genetic mechanisms, and petroleum geological significance through comprehensive investigation, comparative analysis, and integrated interpretation. Five important progresses have been made.

(1) Strike-slip fault stratification is a localized phenomenon within cratonic superimposed basins, rather than a regionally extensive characteristic. It is prominently developed in the Tabei-Tazhong area of the Tarim Basin, the central Sichuan Basin, and the southwestern Ordos Basin.

(2) Within these three major cratonic superimposed basins, strike-slip fault stratification exhibits four principal manifestations: ① Major regional unconformities serve as the primary detachment interfaces for vertical fault segmentation; ② Vertical stacking between different structural layers occurs in both strike-parallel and strike-divergent configurations; ③ Within individual structural layers, strike-slip faults may not be fully penetrative vertically, often separated by interval zones of appreciable thickness; ④ Stratification characteristics are not exclusively controlled by basement fault reactivation.

(3) Strike-slip fault stratification is classified into two genetic types: inter-layer stratification (between structural layers) and intra-layer stratification (within a single structural layer). In the Tabei-Tazhong area, central Sichuan, and southwestern Ordos Basin, the inter-layer type exhibits "two-layer," "three-layer," and "four-layer" architectures, respectively. The intra-layer type is characterized by faults terminating within specific strata, with significant interval zones—such as within the Upper Ordovician, Lower Cambrian, Carboniferous-Permian, and Lower Triassic formations, respectively—where faulting is absent, constituting crucial vertical separations.

(4) Strike-slip fault stratification is governed by three essential conditions: a stable crystalline basement, a thick sedimentary cover, and compressional stress. Inter-layer stratification is primarily controlled by polyphase regional stress fields, whereas intra-

layer stratification is mainly influenced by the downward attenuation of contemporaneous tectonic stress and variations in deep structural settings.

(5) The stratification patterns of strike-slip faults not only corroborate the existence of regional vertical tectonic decoupling within cratonic superimposed basins but also provide a framework for understanding the deep-seated mechanisms governing vertically stratified and independently accumulated hydrocarbon reservoirs in cratonic interiors. Currently, studies in the Ordos Basin demonstrate that the downward convergence zones of stratified strike-slip faults are frequently associated with the most severe drilling fluid losses. This understanding offers important theoretical support for drilling program design and early warning during engineering operations.

Key words: strike-slip fault; craton; superimposed basin; layering; basement; Tarim Basin; Sichuan Basin; Ordos Basin; hydrocarbon exploration; drilling engineering.

0 引言

中国内陆大型含油气盆地多是发育在早期克拉通之上的多旋回叠合盆地,其形成和演化受控于中国区域大地构造的发展,总体表现为深层海相、中深层海陆交互相和浅层陆相盆地的多方位叠置(汤良杰,2001,2009)。不同世代盆地往往被大型不整合面分隔,表现出在叠置方式、接触关系、构造变形、成藏就位等方面的巨大差异(刘池洋,2007)。多年来,不同学者重点围绕不同世代盆地的构造差异变形,即不整合结构、大型隆起或坳陷、地层分布情况等方面的研究取得了很大的进展(何登发,2010;庞雄奇等,2012),但对不同世代盆地的构造属性转换及构造特征差异还缺乏深刻的理解和认识。近年来,随着三维地震勘探技术的进步,在我国中西部的塔里木、四川及鄂尔多斯盆地内部均发现规模发育的走滑断裂带,这些走滑断裂带往往以切穿某一构造层为主,不同构造层之间在构造样式、展布方式等方面都存在巨大的差异,表现出明显的分层特性(马庆佑,2023;张弛,2024;郑和荣,2022;管树巍,2022;邓尚,2021;罗彩明,2022;梁瀚,2023;刘永涛,2020;周义军,2023;陈红汉,2023;叶慧,2023;Huang Lei et al.,2025)。

走滑断裂的分层特性不仅可能记录了不同世代盆地的构造差异变形特征,而且也是解剖构造体制转换过程的重要线索,深入研究意义重大。目前资料揭示,克拉通内走滑断裂往往被大型不整合面分隔,表现为“花上花”的发育特点,这与盆缘大型逆冲断裂“一穿到底”或沿软弱层滑脱分层的变形特征存在本质差异。有些走滑断裂在同一构造层内断裂活动表现为“上强下弱”特征,这与盆缘区大型走滑断裂“下强上弱”、自深向浅活动强度变弱的特征形成鲜明对比。克拉通内走滑断裂还表现为与基底断裂走向不一致的特点,这揭示了盖层内小型走滑断裂与基底大型断裂关联度可能不高。同时,走滑断裂的分层特性为深层-超深层油气成藏提供了极为重要的保存条件,断裂在深层海

相碳酸盐岩地层中切穿源-储层系，向上不切穿沉积盖层，纵向上构成了有效的源-储-盖组合，油气勘探意义重大。

结合目前研究现状，笔者认为克拉通走滑断裂分层研究还存在三个方面的薄弱点：（1）走滑断裂分层形成的应力背景；（2）走滑断裂分层与基底大型断裂活动在垂向上的关联度；（3）走滑断裂分层的控藏机理。基于此，本文以我国中西部塔里木、四川、鄂尔多斯三大克拉通叠合盆地为研究窗口，系统分析走滑断裂分层特性的表现形式、成因机制及油气地质意义，这一方面有利于进一步完善克拉通叠合盆地地质理论，另一方面为提升油气勘探成功率提供重要依据，具有非常重要的科学意义和现实意义。

1 地质概况

塔里木、四川、鄂尔多斯盆地都是从塔里木、扬子和华北地台基础上发展形成的克拉通叠合盆地，整体都发育海相、海陆过渡相、陆相三大沉积旋回（何治亮，2003；何登发，2022），其演化历程受特提斯、古亚洲洋、滨太平洋及喜马拉雅构造域制约，至新生代形成了彼此位置相近、地层结构相似的三大叠合盆地。三大盆地现今外形轮廓呈菱形或矩形，外围被不同时期造山形成的逆冲断裂体系所围限（图1）。三大盆地内部均发育多组方向的走滑断裂带，以奥陶系为例，塔里木盆地发育NW、NNE两组方向走滑断裂带（贾承造，2021）；四川盆地发育发育NWW、NEE两组方向走滑断裂带，东缘发育挤压背景下的褶皱相关断层，其性质主要为逆断层，呈NE向展布（焦方正，2021）；鄂尔多斯盆地发育NW、NE和NNE三组方向的走滑断裂带（Liu Yongtao, et al., 2024）发育盐变形相关断层，断裂性质较为复杂（陈平，2024；刘卫帅，2024）。

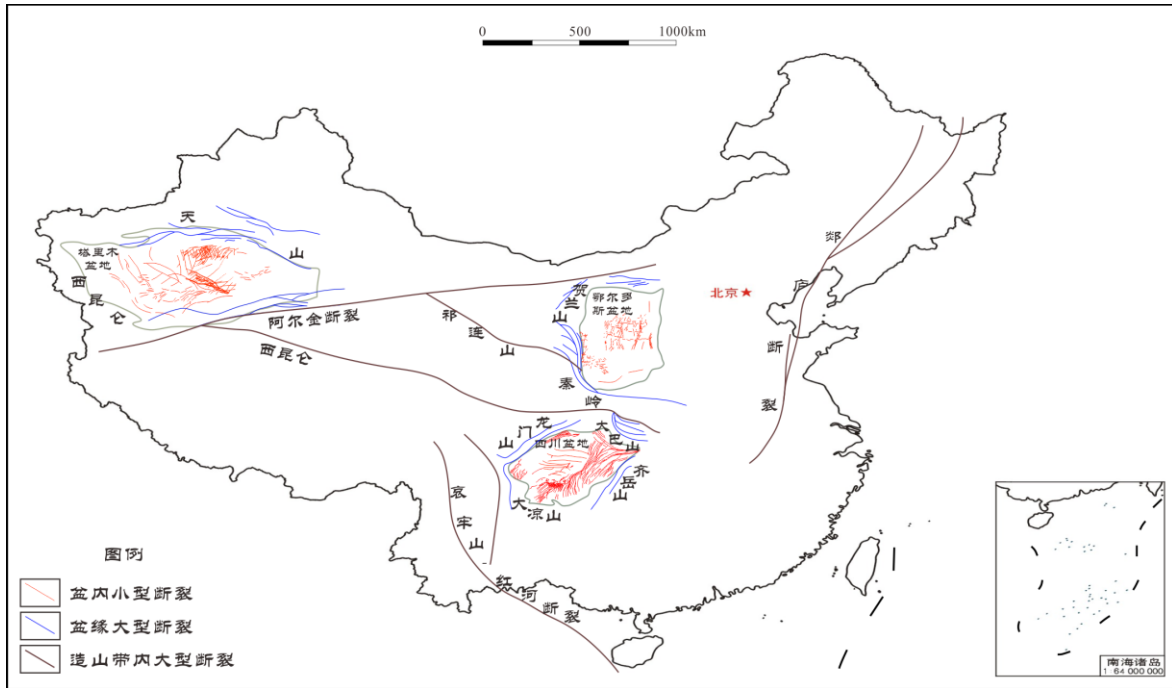


图1 三大克拉通盆地大地构造位置及奥陶系断裂平面分布图（据邓尚等，有修改，2021）

Fig.1 Tectonic framework and planar distribution map of ordovician faults in the three major cratonic basins (modified after Deng Shang et al., 2021)

2 分布特征

目前研究表明：在我国中西部的塔里木、准噶尔、四川和鄂尔多斯盆地均发现走滑断裂的垂向分层特征（田安琦等，2022），但在国外盆地类似的报道相对较少（莫午零等，2024），这可能与我国克拉通叠合盆地的演化时间长、叠合构造发育相关。因此，走滑断裂分层特征应在克拉通叠合盆地内部具有普遍性。但从断裂的垂向分层特征来看，盆地内部并不全是走滑断裂的纵向叠置，在靠近盆地边部的盆内区域也发现有正断层、逆断层或反转断层与走滑断裂在纵向上的叠置关系，这充分体现了断裂分层的复杂性，给区域地质研究带来难度。

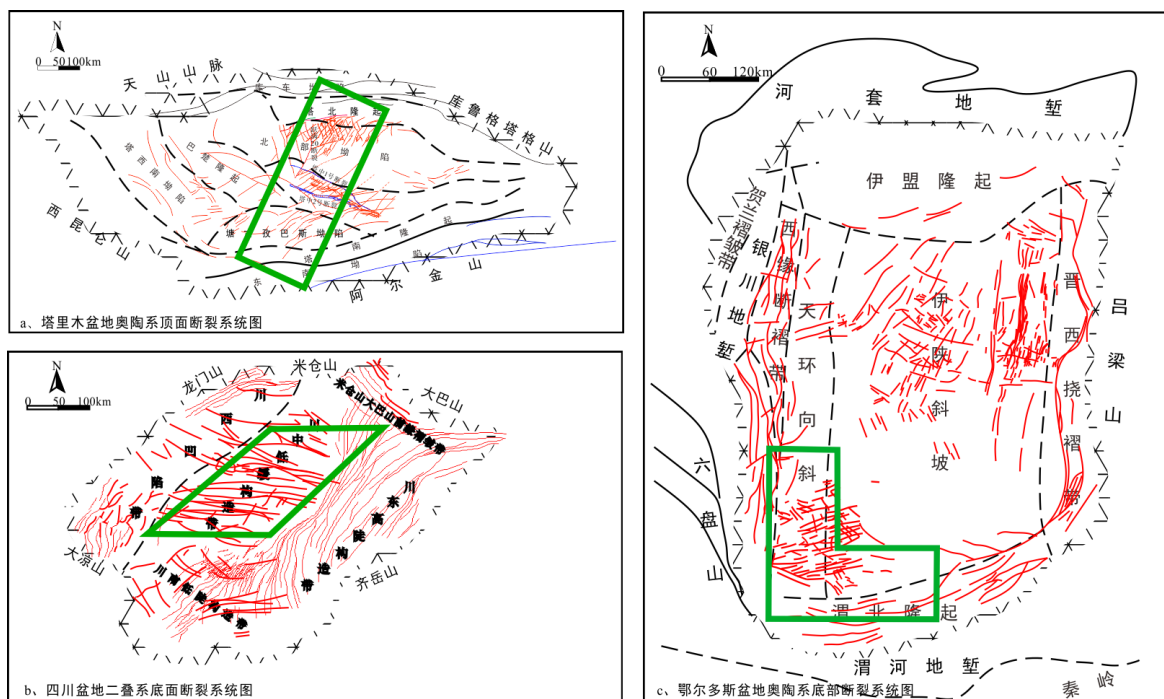


图 2 三大克拉通盆地内部走滑断裂分层发育区的区域位置图

Fig.2 Location map of the stratified strike-slip fault zones within the three major cratonic basins

针对三大盆地而言，塔里木盆地西部的巴楚-麦盖提地区表现出寒武系走滑断裂与奥陶系逆冲断裂在纵向上的叠置关系（张仲培等，2023），而塔北-塔中地区则发育多层叠置的走滑断裂带（图 2a）；四川盆地东缘涪陵地区表现为深部走滑断裂与浅部逆冲断裂的分层叠置，膏盐岩层是主要的间隔层（段金宝等，2023），而川中地区则表现为多层走滑断裂的纵向叠置（图 2b）；鄂尔多斯盆地东缘与四川盆地相似，表现为以奥陶系膏盐岩层为界，向下发育的走滑断裂与向上发育的盐岩滑脱形成的断隆带，而盆地的西南部则表现为不同走向走滑断裂带的上下叠置，分层特征非常明显（图 2c）。

因此，克拉通盆地内部不同性质断裂的分层叠置模式具有一定的分区性，不同区块内部都有其对应的构造背景和构造样式，将其分区解剖、系统总结应是克拉通叠合盆地断裂构造研究的核心思想。本文结合工作实际，只将走滑断裂纵向分层的部分区块作为研究范围，即塔里木盆地的塔北-塔中地区，多条 NE 向走滑断裂带呈矩形分布；四川盆地的川中地区，多条 NW 向走滑断裂呈菱形分布；鄂尔多斯盆地的西南部，NW、NE、NNE 三组方向的走滑断裂带呈“L”的分布范围。

3 主要表现形式

由于三大盆地走滑断裂发育的控制因素等方面的差异，也会造成走滑断裂分层具有一定的共性特征和个性特征。本文通过对三大盆地的系统对比分析总结，找出其发育的

内在规律，即走滑断裂发育的共性特征，共有四大共性特征。这是认识克拉通内走滑断裂纵向分层的基础。

3.1 大型不整合面是走滑断裂分层的主要分界面

在克拉通盆地内部，不整合面尤其是区域性不整合面往往是重要的构造运动界面。区域构造运动在形成不整合面的同时，往往也会造成地层剥蚀、岩溶或白云岩化、岩浆活动及走滑断裂的形成，其中，走滑断裂往往是沿古老的不整合面向下卷入同一构造层的构造变形。随后，该期的走滑构造及不整合面被沉积地层覆盖深埋，并在晚期的构造层内又会产生新的走滑构造变形。如果上下两个构造层内的走滑断裂互不叠加或叠加作用不强，那么就会形成以不整合面为界的走滑断裂分层叠置模式，即走滑断裂的分层特征。这在三大盆地表现明显。

塔里木盆地塔北-塔中地区走滑断裂大致以奥陶系/志留系区域不整合面为界，形成两层结构（图 3a），寒武-奥陶系碳酸盐岩内走滑断裂为线性展布的压扭性质，志留系-二叠系碎屑岩内走滑断裂为雁列式展布的张扭性质，有些断裂在晚期仍有活动，继承性向上发展，断穿至三叠系及以上地层。四川盆地川中地区走滑断裂以震旦系/寒武-下二叠统、下二叠统/上二叠统-三叠系两个大型的区域不整合面为界，形成三层走滑断裂系统（图 3b）。震旦系以张扭性质的负花状样式为主，寒武-志留系以压扭的正花状样式为主，二叠系及以上地层断裂数量减少，局部发育雁列式张扭断裂（梁瀚，2023）。鄂尔多斯盆地西南部以寒武-奥陶系/石炭-二叠系、二叠系/三叠系、三叠系/侏罗系-白垩系三个大型不整合面为界，走滑断裂具有四层结构（Liu Yongtao, et al., 2024）（图 3c），寒武-奥陶系发育 NNE 向走滑断裂带，在盆地西南部的围绕古生界古隆起区域表现明显；在石炭-二叠系及下三叠统内，走滑断裂发育尺度小，数量少，甚或不发育；三叠系发育 NW、NE 两组张扭性质的走滑断裂带，侏罗-白垩系发育以 NE 向为主、具有张扭性质的走滑断裂带。

这里需要说明的是，走滑断裂在叠合构造层间的分层具有区域性特点，分层的明显程度受地层厚度变化、距离盆缘远近、地层构造起伏等因素的影响。走滑断裂的分层不是绝对的，局部地区往往存在上下构造层间走滑断裂相互叠加变形的特点，但这并不影响对盆地内部走滑断裂分层变形这一客观规律的认识。

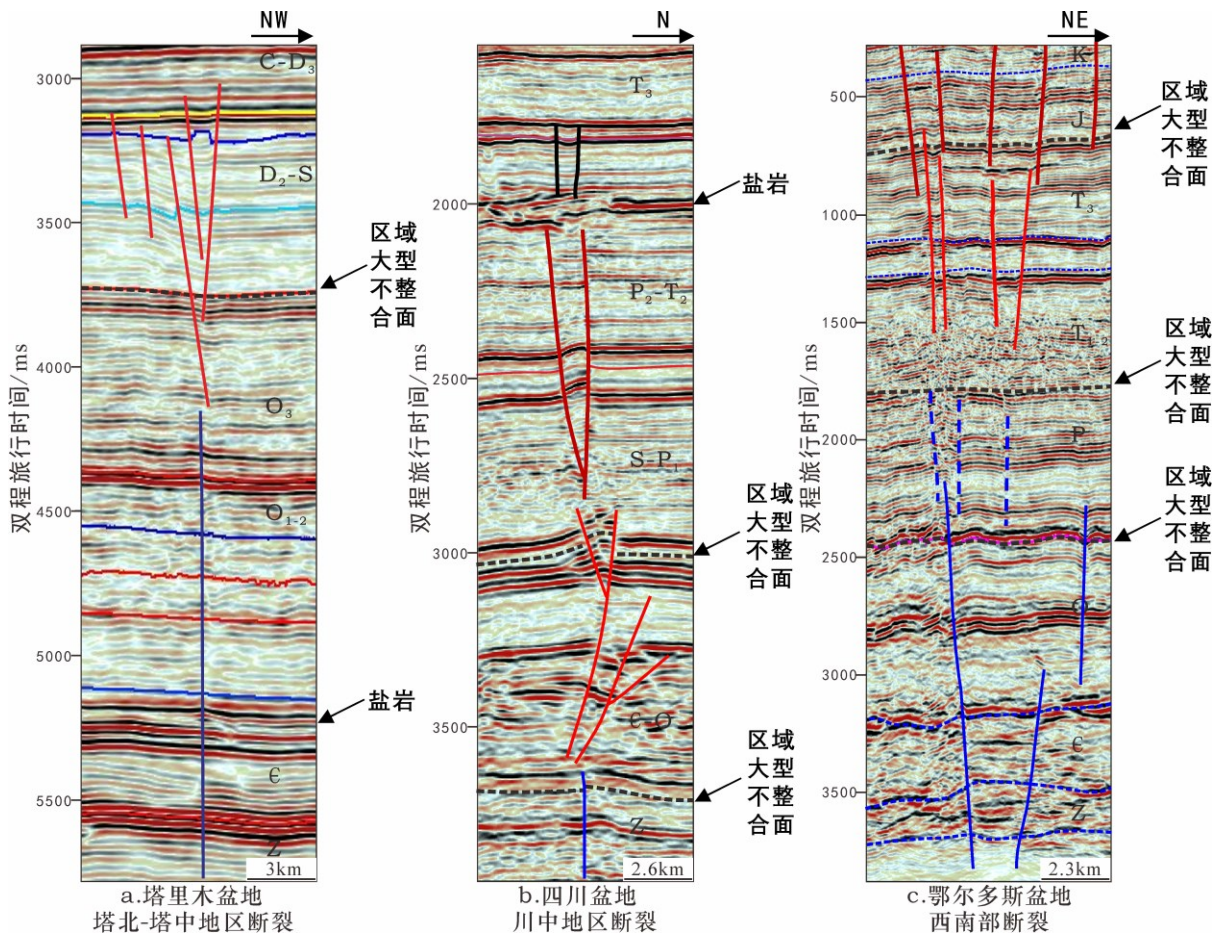


图3 三大克拉通盆地内部走滑断裂地震解释经典剖面

Fig.3 Representative seismic interpretation profiles of strike-slip faults within the three major cratonic basins

3.2 不同构造层之间发育同一走向和不同走向两种分层叠置模式

从力学机制上可将克拉通内走滑断裂划分为单剪和纯剪两种类型。单剪是指走滑断裂沿某一优势方向生长发展；纯剪是指呈X型交切关系的两组方向走滑断裂共轭发展，后期某一方向走滑断裂持续生长发展，而另一方向的活动不明显甚或夭折。本文通过对三大盆地走滑断裂分层特征的系统分析，将其划分为同一走向分层叠置和不同走向分层叠置两种发育类型。

塔里木盆地富满地区不同构造层内走滑断裂在发育位置上具有继承性，即不同构造层内走滑断裂带的发育位置上下几乎重合（图4）。同时，不同期次走滑断裂纵向上叠加作用不强，走滑构造变形在地震剖面上具有“下弱上强”的特征，表明晚期走滑活动强度要大于早期。四川盆地川中地区不同构造层内走滑断裂在发育位置上也具有继承性，断裂垂向断距在地震剖面上具有“下大上小”的特点，表明走滑变形具有“早期强、晚期弱”的活动规律。通过断裂带内方解石脉体的定年结果揭示，晚期走滑活动造成了早

期走滑断裂的再活动,这一特征在四川盆地表现地较明显(付小东,2023;鲁雪松,2024)。鄂尔多斯盆地西南部不同构造层内走滑断裂在发育位置上并不继承,表现为每一期次构造活动以生成新的走滑断裂为主。通过地震剖面走滑构造变形及地震切片综合判断,同一期次走滑断裂具有边缘地带活动强、盆地内部活动弱的特点;盆内不同期次走滑断裂活动强度具有加里东期弱、印支期较强、燕山期最强的特点。

由此可见,塔里木、四川多表现为同一走向走滑断裂的纵向分层叠置,这体现了早期走滑断裂形成的构造薄弱带对晚期走滑断裂的形成具有“定位”作用,纵向上不同层系的断裂已经连接或趋于连接,且在成因上具有一定的联系。鄂尔多斯盆地西南部发育典型的走向走滑断裂分层叠置类型,体现了早期断裂与晚期断裂几乎完全没有关联,这与以往认识存在很大的差异。

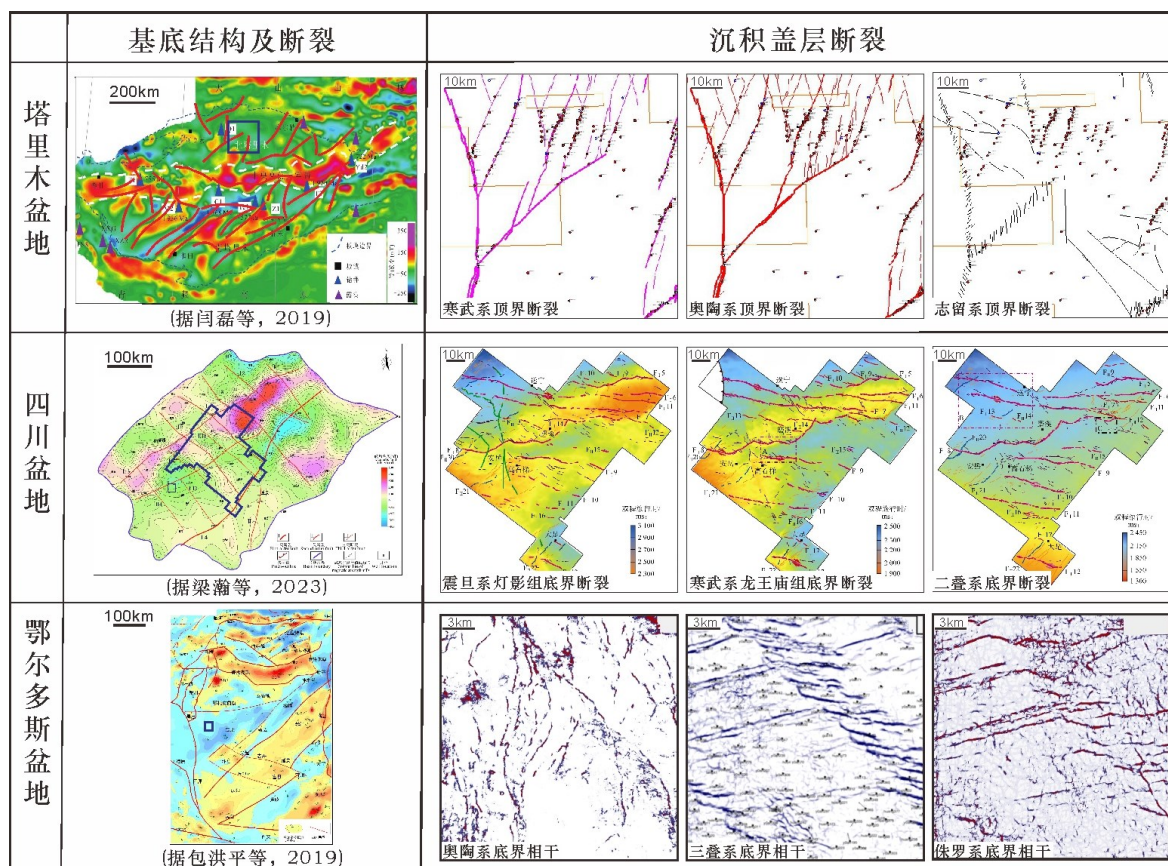


图4 三大克拉通盆地基底断裂与沉积盖层断裂的纵向和平面发育特征对比图

Fig.4 Comparative analysis of vertical and planar development characteristics between basement faults and sedimentary cover faults in the three major cratonic basins

3.3 同一构造层内也可以发育一定厚度的间隔层

当某一构造层的厚度较大时,走滑断裂在纵向上并不一定贯穿整个构造层,而是只断穿整个构造层的上部分,下部分地层没有被走滑断裂穿过,可以看作与下伏构造层内

走滑断裂之间的间隔层。

塔里木盆地塔北-塔中地区的走滑断裂以奥陶系/志留系不整合面为界,在志留系之上和奥陶系之下的两套构造层之间,上奥陶统内发育厚度约 1000m 的砂泥岩互层,该套地层内部断裂不发育,是两者之间重要的断裂纵向间隔层(图 5a)。四川盆地川中地区以震旦系/寒武系、寒武系-二叠系/三叠系两个不整合面为界,走滑断裂具有纵向上的三层结构。在震旦系和寒武系两套构造层之间,下寒武统筇竹寺组发育厚度约 700m 的泥岩沉积,该套层内断裂不发育,是两者之间重要的断裂纵向间隔层(图 5b)。川中地区上、下二叠统之间,断裂性质发生变化,但间隔层不甚发育。在川中东部地区,以中下三叠统的膏盐岩为界,膏盐岩内部及以上地层发育的隔挡式褶皱(管树巍等,2022),但很难判断其内部断裂是否为走滑性质为主,因此,本文对此不作讨论。鄂尔多斯盆地西南部是全盆地沉积盖层最厚的区域,大致以寒武-奥陶系/石炭-二叠系、二叠系/三叠系、三叠系/侏罗系-白垩系三个大型不整合面为界,走滑断裂具有纵向上的四层结构。从沉积盖层内断裂发育程度来看,石炭-二叠系及下三叠统内断裂不发育,且具有向上断裂密度逐渐减小、尺度逐渐降级的特点,至下三叠统内部断裂几乎不发育(图 5c)。石炭-二叠系及下三叠统为一套海陆过渡相、陆相砂泥岩互层沉积,地层厚度在 200~1500m 之间,上覆的中上三叠统及以上地层内部的 NW、NE 向走滑断裂向下切割大致在此位置消失,下伏的下古生界断裂向上在此位置表现为密度和尺度的逐渐减小,因此,可将该层段作为鄂尔多斯盆地西南部最为重要的断裂间隔层。鄂尔多斯盆地断裂的这一分层特色在三大盆地中最为典型,充分体现了克拉通叠合盆地内部构造变形的特殊性。

这里需要说明的是,由于间隔层紧邻区域不整合面,往往是构造体制转换阶段沉积的一套特殊塑性岩性体,如塔里木盆地寒武系/奥陶系之间的奥陶系上部发育一套泥岩;四川盆地在震旦系/寒武系之间的寒武系底部发育筇竹寺组泥岩;鄂尔多斯盆地在石炭-二叠系/奥陶系之间的二叠系底部发育一套煤系地层。目前这些地层内部走滑断裂相对不发育,这就很难判断其断裂不发育的原因是由于邻近不整合面造成的,还是由于塑性层的存在造成的。本文认为,这些塑性地层内部断裂不发育的主要原因是由于某一期次走滑构造变形向下影响深度范围有限造成的,而塑性层的存在只是加剧了走滑断裂纵向分层的程度,这在后面进行详细论述。

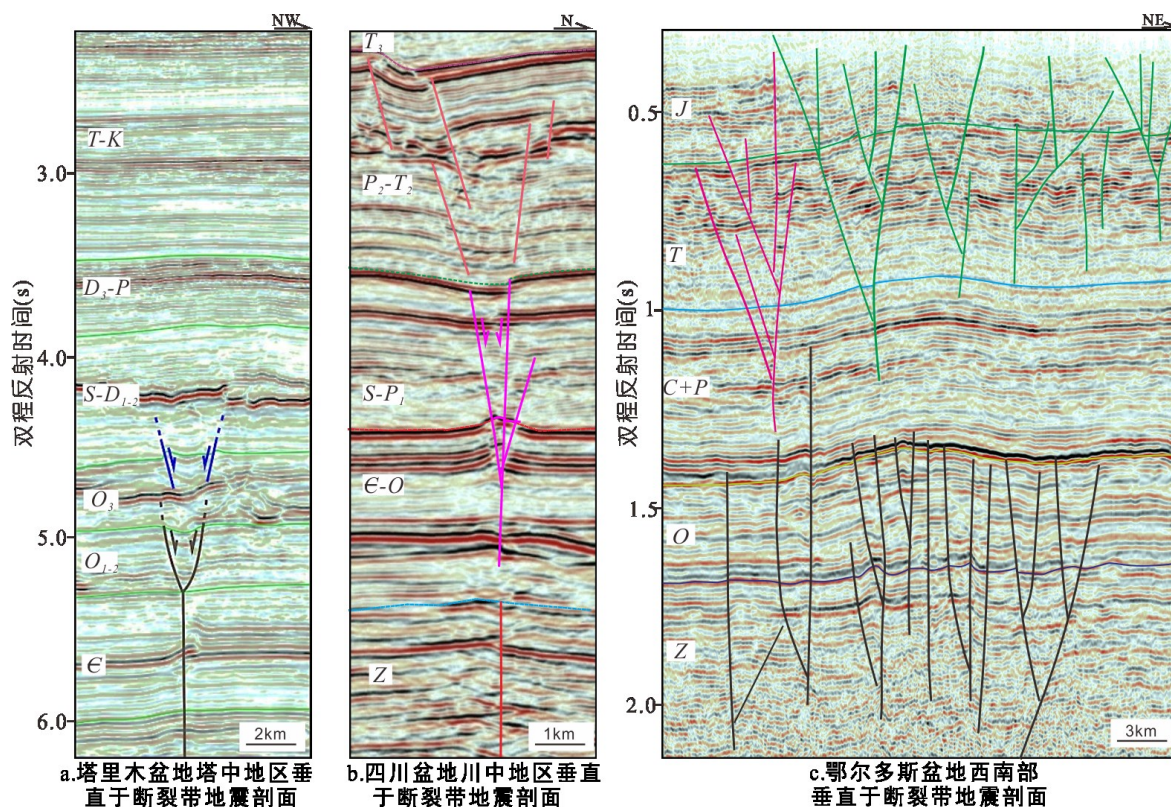


图 5 三大克拉通盆地走滑断裂分层变形的经典地震解释剖面

Fig.5 Typical seismic interpretation profiles illustrating the layered deformation of strike-slip faults in the three major cratonic basins

3.4 走滑断裂分层特征并不完全受基底断裂控制

本文通过系统对比三大盆地基底断裂与沉积盖层内走滑断裂的发育特点,认为克拉通内走滑断裂不完全受基底断裂控制,理由如下:(1)走滑断裂在纵向上是分层的,而且往往存在一定厚度的间隔层,而基底断裂的活动向上影响会造成整个沉积地层形成走滑断裂破碎带,不会存在间隔层;(2)走滑断裂的纵向分层和分期的,而且鄂尔多斯不同构造层内走滑断裂展布方向都不同,根本无法用基底断裂活动的影响来解释;(3)塔里木盆地和四川盆地基底断裂走向和走滑断裂存在一定的夹角,很难进行解释。

如图 4 所示,塔里木盆地基底结构在重磁资料上主体表现为中部为近东西向的正异常(图 5),北部为宽缓的负异常,南部为正异常和负异常相互间隔的呈 NE 向的条带展布(闫磊等,2013)。应用 3 万平方公里的三维连片地震对塔北地区的走滑断裂进行识别,从结果可以看出,寒武系顶界、奥陶系顶界及志留系顶界均发育 NW、NE 两组方向的共轭走滑断裂带,不同层系走滑断裂发育位置上下几乎重合,但断裂展布方式存在差异,体现了盖层内深部先存断裂对浅部断裂的控制作用。同时,对比塔里木盆地基底的重磁结构和走滑断裂发育特征可以看出,盆地北部基底并无异常的条形磁带,表明基底

断裂并不发育,这进一步说明了相对稳定的基底结构和盖层内的走滑断裂并无直接关联。四川盆地基底结构在航磁资料上表现为 NE 向的磁异常高带,同时这些高磁异常区被 NW 向构造分隔,证实深部存在 NW 向基底断裂(梁瀚等,2023)。应用 2.4 万平方公里的三维地震进行走滑断裂识别揭示,川中地区震旦系、寒武系及二叠系底界的走滑断裂均呈 NWW、NEE 向展布,且以 NWW 向展布为主,但这与深部 NW 向的基底断裂在走向上有一定的偏转。鄂尔多斯盆地基底结构在航磁资料上总体呈现以 NE 向为主的趋势,尤其在盆地本部地区(包洪平等,2019),一般认定不同磁条带的变化位置即为基底断裂的发育位置。应用盆地西部 500km²的三维地震进行断裂识别,从结果可以看出,奥陶系、三叠系及白垩系底界发育不同展布方向的走滑断裂带。这种发育规律深刻揭示了沉积盖层内的走滑断裂与基底断裂并不直接关联的规律。

由此可见,走滑断裂在沉积盖层内的展布方向是变化的,同时可以发育一定厚度的间隔层,而且目前没有发现某一期次沉积盖层内的走滑断裂带与基底断裂的展布方向相一致。但基底断裂对沉积盖层内早期断裂的形成演化仍具有一定的“定位”作用,可能与沉积盖层内的走滑断裂存在间接联系。因此,基底断裂不完全控制沉积盖层内走滑断裂的形成发展,但它们之间存在一定的间接联系。

4 类型和成因机制

4.1 类型划分

本文将走滑断裂分层划分为不同构造层间分层和同一构造层内分层两种类型(表 1),前一种类型是大尺度的、高级别的分层划分,体现了不同期次走滑断裂在沉积盖层内的纵向叠加方式;后一种类型是小尺度的、低级别的分层划分,体现了某一期次构造运动过程中走滑断裂发生构造变形的纵向分异特征。两者共同体现了克拉通叠合盆地内部走滑断裂形成和演化的特殊性。

从走滑断裂分层的两种类型的成因机制来看,三大盆地不同构造层之间的断裂分层主要受控于不同期次构造运动在盆地内部纵向上的强叠加、弱改造作用,而同一构造层内的断裂分层主要受控于两个方面的因素:一是间隔层所处的构造层对应的古构造背景相对稳定,原型盆地周缘构造活动对盆地内部的影响作用很小,所以缺乏与之对应的断裂体系;二是某一期次走滑断裂在形成演化过程中,向下由于古应力的逐渐衰减及古构造环境的变化,造成走滑断裂在同一构造层的上部发生构造变形而下部构造变形微弱甚至不发生构造变形,这在后面进行详细论述。走滑断裂分层的两种类型从不同维度体现

了克拉通内部走滑断裂发育的两个鲜明特色,两者共同揭示了控制走滑断裂形成演化的内部和外部因素,为走滑断裂运动学及动力学分析及成藏作用研究提供了重要依据。

表 1 三大克拉通叠合盆地内部走滑断裂分层的两种类型及控制因素对比表

Table.1 Comparative table of the two types of strike-slip fault stratification and their controlling factors within the three major cratonic superimposed basins

分层发育区		不同构造层之间分层			单一构造层内部分层		
盆地	发育区	分层特征	分界面	控制因素	分层特征	间隔层	控制因素
塔里木盆地	塔北塔中	呈双层结构, ϵ -O 呈 NNE、NNW 向压扭; S-P 呈 NNE 向张扭。	发育 O/D-S 区域不整合面	加里东中期、加里东晚期-海西早期、海西晚期三期构造运动的影响。	ϵ -O 构造层内, O_{1-2}/O_{3-S} 层间分层。	上奥陶统桑塔木组断裂不发育, 厚度约 1000m, 为间隔层。	加里东晚期-海西早期垂向应力衰减和构造环境变化引起的。
四川盆地	川中	呈三层结构, Z 呈 NW 向张扭; ϵ -P ₁ 呈 NW 向压扭; P ₂ -T 呈 NW 向张扭。	发育 Z/ ϵ -P ₁ /P ₂ -T 两个区域不整合面	桐湾期、加里东-海西早期、海西晚期三期构造运动的影响。	ϵ -P ₁ 构造层内, $\epsilon_1/\epsilon_{2-3}$ 层间分层。	下寒武统筇竹寺组断裂不发育, 厚度约 700m, 为间隔层。	加里东期走滑断裂垂向应力衰减和构造环境变化引起的。
鄂尔多斯盆地	西南部	呈四层结构, ϵ -O 呈 NNE 向张扭; C-P-T ₁₊₂ 断裂不发育; T 呈 NW、NE 向张扭; J-K 呈 NEE 向张扭。	发育 ϵ -O/C-P/T/J-K 三个区域不整合面	加里东期、海西期、印支期、燕山期四期构造运动的影响,海西期构造运动影响微弱。	T 构造层内, T ₁ /T ₂₋₃ 层间分层。	C-P、T ₁ 层内断裂不发育, 厚度 200-1000m, 为间隔层。	双重作用影响,一是海西期构造影响作用小;二是印支期垂向应力衰减和构造环境变化引起的。

4.2 成因机制

4.2.1 挤压应力、稳定基底、厚盖层是走滑断裂分层的先决条件

本文通过系统总结分析,认为克拉通内走滑断裂分层需要具备三大地质条件:第一,盆缘的挤压应力。因为只有挤压应力才能保证从克拉通边部向内部传递,造成克拉通内部发生走滑构造变形。盆缘的伸展应力作用一般不会向克拉通内部传递,也不会向克拉通内部形成对应的构造变形记录。第二,坚硬基底结构的克拉通块体。在挤压应力由克拉通边缘向克拉通内部传递过程中,构造变形并不是挤压型构造由强变弱的过程,而是表现为克拉通边缘和内部产生截然不同的构造变形体系,即克拉通边缘以挤压构造变形为主,克拉通内部以走滑构造变形为主,且两者界限非常明显。这是因为当挤压应力由外向内的传递过程中,应力作用于沉积盖层的构造环境发生了巨大变化。由于在克拉通边缘无稳定基底,多具有“软变形”挤压构造特征,而一旦进入克拉通内部,由于具有稳定基底的克拉通块体起到了“中流砥柱”的作用,挤压应力迅速转变为走滑-剪切构造应力,多具有“硬变形”的走滑构造样式。这也是克拉通内产生走滑断裂的根本原因,也为走滑断裂后期的分层发育奠定了基础。第三,多期叠合的沉积盖层。克拉通内部发

育厚度较大的、被多期不整合面分隔的沉积盖层，这是走滑断裂分层发育的物质基础。在克拉通的演化过程中，早期沉积的地层会被晚期沉积的地层掩盖深埋，造成克拉通基底发生构造沉降，晚期来自盆缘的应力只会影响到克拉通内一定深度范围的地层，因为早期沉积的地层已沉降到盆缘造山作用影响的深度范围以下，这样在克拉通内晚期形成的走滑构造并不会对早期形成的、被掩盖深埋的走滑构造进行叠加改造，形成了走滑断裂垂向分层变形特征。这样在盆缘多期挤压应力作用下，盆内就会形成多期叠置的走滑断裂体系，垂向上表现为走滑断裂的分层发育特征。

4.2.2 不同期次的挤压应力是不同构造层之间断裂分层的根本原因

某一构造层内走滑断裂体系的形成受控于该期走滑-剪切区域应力场。三大盆地不同期次构造应力纵向叠加，就会在盆地内部各个构造层内形成相对独立的走滑断裂体系。

加里东中期，塔里木板块南缘受古昆仑洋、古阿尔金洋俯冲闭合影响，在对应的寒武-奥陶纪构造层内形成一系列 NE 向走滑断裂体系及 NNE、NNW 向共轭走滑断裂体系；加里东晚期-海西早期，受板块南缘古阿尔金洋闭合后碰撞造山的影响，早期断裂活化，在对应的上奥陶统-志留系构造层内新产生一系列的雁列式张扭断裂；海西晚期，南天山洋关闭，盆地北部发生陆-陆碰撞造山作用，在对应的石炭系-二叠系构造层内产生张扭性断裂。

震旦纪，扬子板块受控于原特提斯洋闭合作用的影响，在斜向俯冲作用下形成张扭断裂；加里东期-海西早期受控于古特提斯洋开合的影响，四川盆地整体表现为近 NS 向挤压、EW 向伸展的区域应力场，在寒武-二叠纪构造层内形成了以 NW 向走滑断裂为主的压扭构造；海西晚期，受峨眉地裂运动影响，包括四川盆地在内的广大范围内形成了 NE-SW 向伸展应力场，造成上二叠统 NW 向走滑断裂带向上继续活动，形成左行雁列式张扭构造（马兵山，2023）。

鄂尔多斯盆地在古生代为华北克拉通的一部分。从目前地震解释来看，深部中新元古界的控槽大型正断层和寒武系-奥陶系内部的断裂体系关联度不高，换言之，寒武-奥陶系具有自身相对独立的断裂体系。奥陶纪之后，盆地本部区域内主要发育具有走滑性质的断裂体系，且走滑断裂的分层特征在三大盆地中表现得最为典型。如图 6 所示，加里东晚期，受秦-祁海槽闭合碰撞作用影响，盆地本部的西南部受力最强，在盆地西南部形成 NNE、NNW 向两组走滑断裂带，且断裂形成演化与中央古隆起密切相关。海西期，兴蒙海槽的关闭挤压作用对盆地北部影响较大，而南部影响相对微弱，目前很难在石炭-二叠系内找到与之对应的断裂体系，一般可见加里东晚期断裂体系跨过不整合面向上

稍有发展。这也是盆地西南部走滑断裂分层特征明显的重要原因之一。印支晚期，盆地南部秦-祁海槽进入陆-陆碰撞阶段，挤压作用进一步加强，盆地北部受阻为封闭性边界，而此阶段盆地东西边界为非限制性边界，此构造背景下在盆地本部、不整合面之上形成呈近东西展布向的多条古河道，同时形成相对独立的 NW、NE 向两组方向走滑断裂体系，且以 NW 向走滑断裂为主。燕山中晚期，盆地形成具有真正意义的东部边界，在周缘多向汇聚应力作用下，天环坳陷初具雏形，同时在盆地本部形成最具规模的 NEE 向走滑断裂体系。需要提及的是，此阶段盆地东缘和西缘均发育近 N-S 向的逆冲断裂体系，其中，盆地东缘受掀斜运动和奥陶系盐岩滑脱双重作用影响，形成几排近似平行的呈南北向展布的“盐隆带”，控制盐隆带的断裂可能走滑作用并不明显，以逆冲滑脱为主（刘卫帅等，2024）。喜山运动对盆地本部影响最大区域也集中在西南部，但由于新生代地层普遍缺失，很难判断当时是否存在对应的断裂体系。由此可见，在不同期次挤压应力作用下，走滑断裂纵向上不叠加、弱改造特征是走滑断裂分层的根本原因；某一期次构造运动表现弱往往会造成断裂不发育，形成较厚的分隔层，这会使走滑断裂的分层特征进一步凸显。需要说明的是，在某一期次走滑断裂发育、对应的构造层厚度较大的情况下，由于走滑构造变形沿不整合面向下影响深度范围有限，往往也会出现一定厚度的间隔层。这是走滑断裂分层的另一控制因素，下一节将进行详细论述。

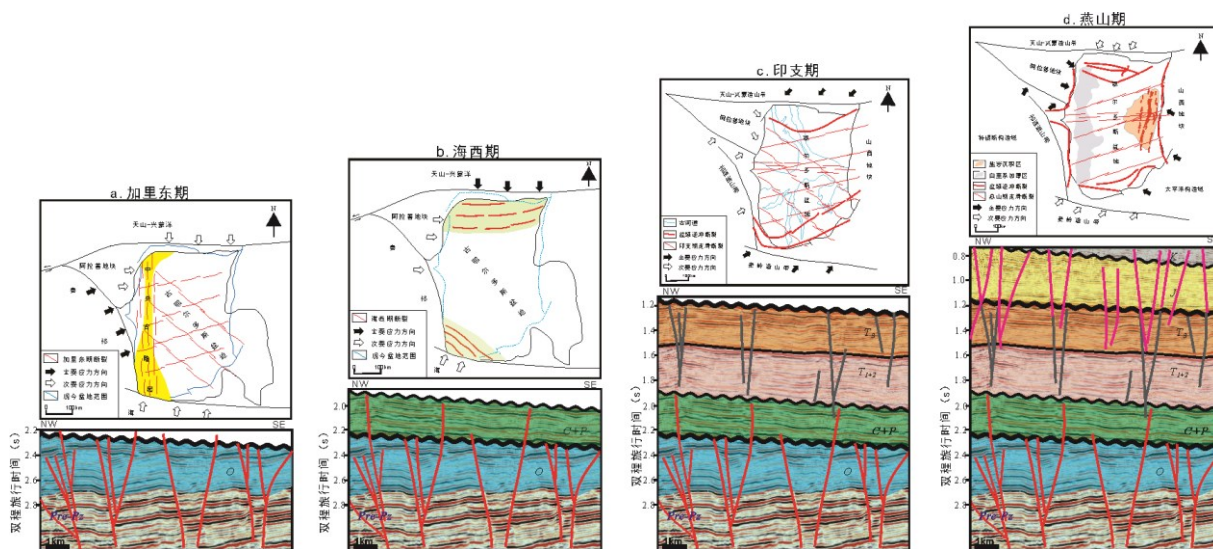


图 6 鄂尔多斯盆地西南部不同时期区域应力场与走滑断裂分层演化模式图

Fig. 6 Evolutionary model illustrating the relationship between regional stress fields and strike-slip fault stratification in different periods in the southwestern Ordos Basin

4.2.3 纵向应力衰减和构造环境变化是同一构造层内断裂分层的关键因素

古埋藏深度也是造成走滑断裂纵向分层的原因之一，以大型不整合面起算，向下约

1500m 的古埋藏深度范围内，构造应力占主导地位，易于产生走滑断裂（图 7）。当古埋深大于 1500m 时，静水压力逐渐占据主导地位，走滑脆性变形会被韧性变形所吸收消耗，当古埋深大于 3500m 时，岩石完全处于静水压力状态，不再产生走滑变形（杨丽华，2021；冯志强，2022；黄雷，2022）。这一认识得到了全球 30 多个国家地应力测试结果的证实（高山，1989；赵德安，2007；Heidbach 0 et al., 2008）。同时，中国煤矿区地应力测试和模拟实验表明：在 1000m 深度的煤样，塑性特征和塑性滑移明显增强；至 1500m 深度，煤样破坏前已明显经历较大范围的塑性变形（谢和平等，2015），这也同样证实了以上认识。我国中西部叠合盆地的单一构造层的厚度多数为 1200m 左右，这样就会在不同构造层内形成具有脆性变形特征的走滑断裂系统，纵向上表现为走滑断裂的分层特征。鄂尔多斯盆地西南部三叠系厚度较大，超 3000m，走滑断裂主要发育在上部延长组 1500m 厚度的范围内，向下走滑断裂特征逐渐减弱并消失，这也从侧面证实了这一认识的适用性。当然，这一重要认识主要是对叠合盆地内部而言的，对盆地边部或构造活动区未必适用，但其弥补了构造地质学中的某些薄弱环节，具有很强的创新性，具有非常重要的理论意义和应用价值。

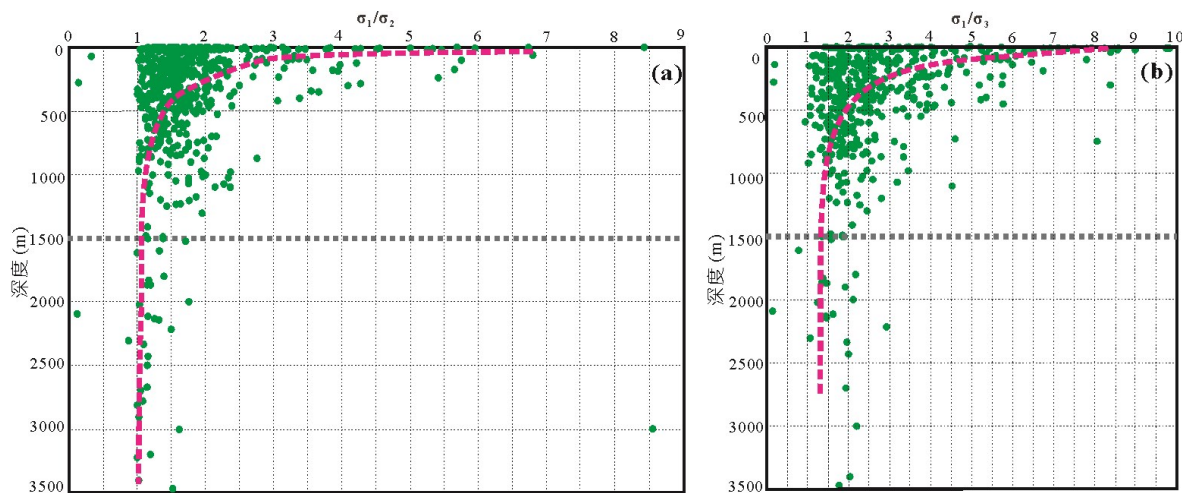


图 7 全球水平应力最大主应力 σ_1 与中间主应力 σ_2 (a)、最小主应力 σ_3 (b) 的比值随深度的变化（据黄雷等，2025）

Fig.7 Variation in the Ratios of Global Horizontal Maximum Principal Stress σ_1 to Intermediate Principal Stress σ_2 (a) and Minimum Principal Stress σ_3 (b) with Depth (after Huang Lei et al., 2025)

5 油气地质意义

5.1 深化克拉通叠合盆地基础地质理论

走滑断裂分层特征揭示了克拉通叠合盆地内部构造变形的特殊性，这和以往人们理

解的前陆盆地、断陷盆地具有深大断裂的特征存在根本差异。这种特殊性可以用纵向上的“构造解耦”来说明。刘树根（2018）依据四川盆地深部元古代俯冲带的保存及不同时代裂陷槽位置的迁移变化较早提出了“构造解耦”的概念。通过以上论述，本文认为塔里木盆地和鄂尔多斯盆地内部也存在构造解耦。由此可见，构造解耦应在克拉通叠合盆地内部具有普遍性，是其构造发育规律的内在体现。构造解耦可以把以往的一些特殊构造（比如分期差异构造变形、层间断层、滑脱构造）的成因统一起来，使人们对于这些特殊构造有了更为客观和深刻的理解。同时，构造解耦也说明了基底断裂与沉积盖层断裂不一定存在必然联系，走滑断裂地震解释不一定非要“一穿到底”，解决了以往断裂地震解释“有根”和“无根”的争议。

5.2 带动油气勘探思路的转变

走滑断裂垂向分层变形新认识目前已在油气勘探领域得到了广泛应用。在鄂尔多斯盆地南部的古峰庄地区，上古生界含气层和中生界含油层纵向叠置，地化指标表明中生界油藏中并未发现古生界天然气的混入，这也从侧面证实了走滑断裂确实是分层发育的（图 8），油和气两大系统是相对独立的，现阶段应用分层勘探的思路符合地质规律。另外，本文认为在以下几个方面可加强走滑断裂分层认识的应用：（1）以往对不整合面相关油气藏的勘探往往侧重于地层和构造圈闭的刻画，其实不整合面是某一期次走滑断裂向上终止的位置，断裂纵向沟通源储，而且会形成断块及古地貌相关构造圈闭，突出走滑断裂及分层规律在有效圈闭评价中的应用有望进一步扩大勘探成果；（2）近年来，碳酸盐岩“断溶体”和碎屑岩“断缝体”的刻画，为油气高产富集区的寻找提供了新思路。但在空间上呈走滑断裂控制的“核-带”结构（陈红汉，2023），其实内部仍具有分层特征，这已在实际钻井中得到验证。加强核-带结构内部的分层结构解剖，对于钻井尤其是入靶点的确定意义重大。

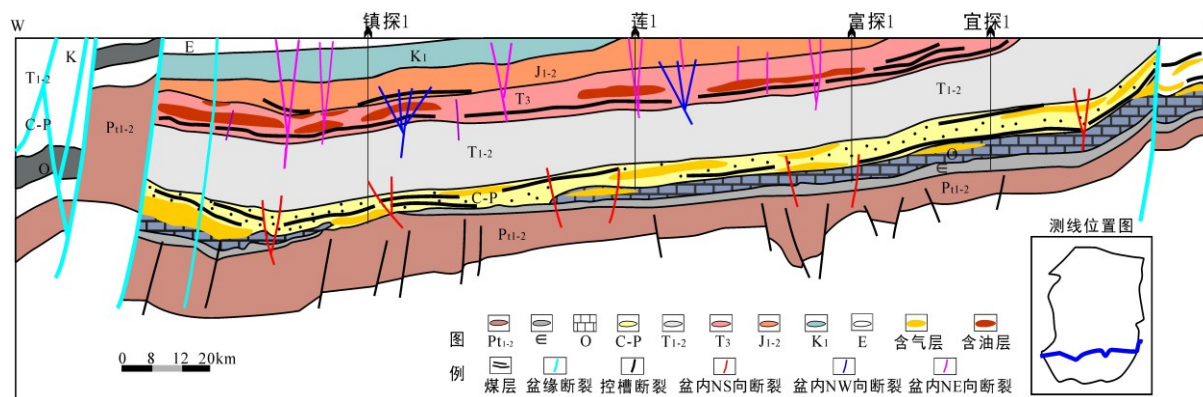
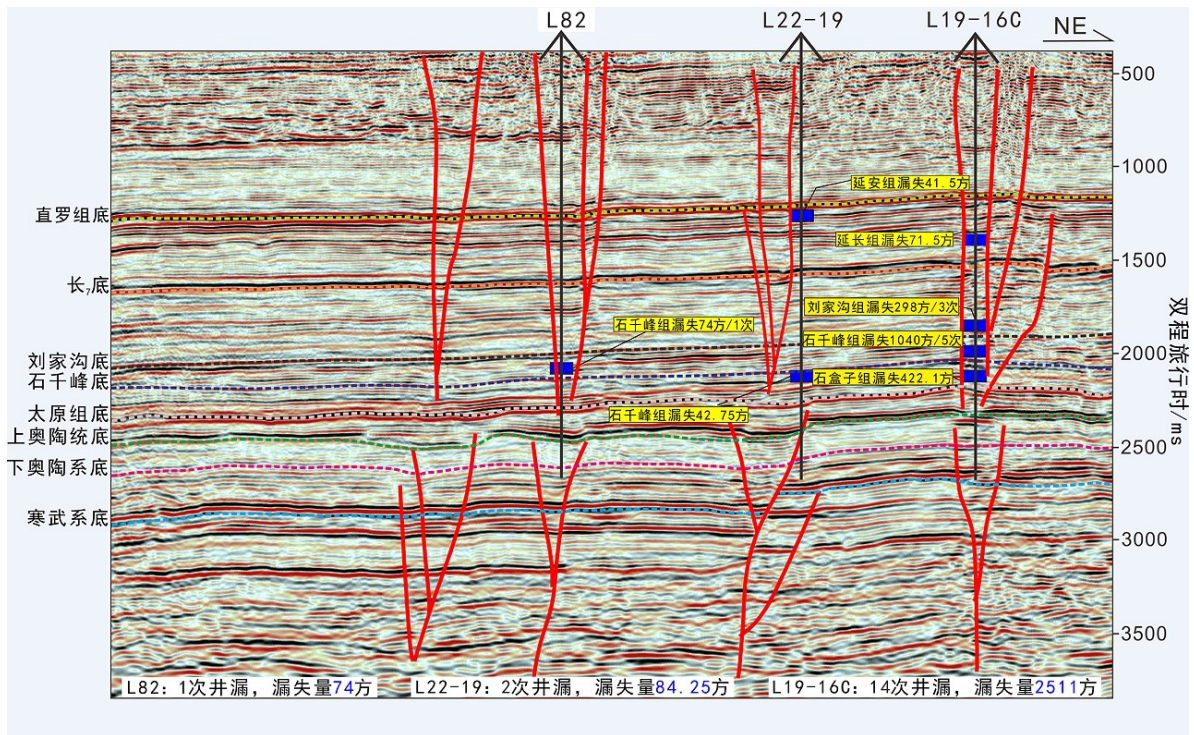


图 8 鄂尔多斯盆地南部古生界与中生界油气分层成藏模式图

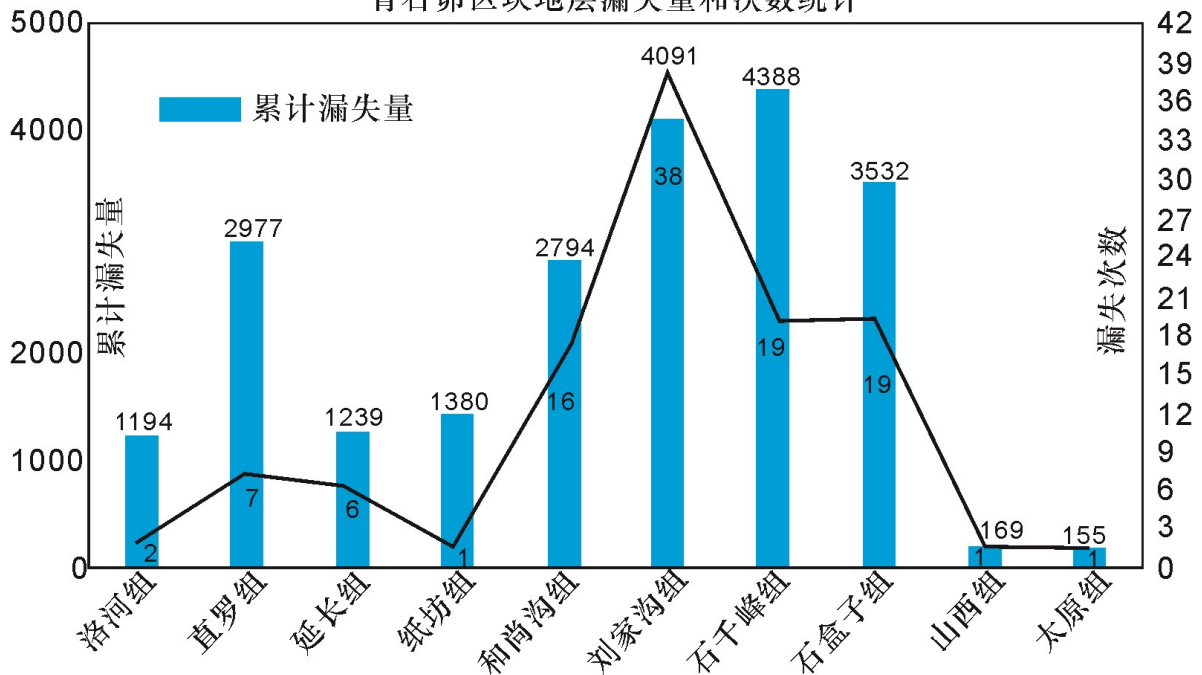
Fig.8 Model of compartmentalized hydrocarbon accumulation in the Paleozoic and Mesozoic

strata of the southern Ordos Basin



(a) 青石峁气田钻井液漏失层位的剖面位置图

青石峁区块地层漏失量和次数统计



(b) 青石峁气田钻井液漏失量和次数统计表

图9 鄂尔多斯盆地西南部青石峁气田钻井液漏失的层位剖面及相关参数统计表

Fig.9 Stratigraphic profile of drilling fluid loss zones and statistical table of relevant parameters in the Qingshimao Gas Field, southwestern Ordos Basin

5.3 未来有望在钻井工程领域发挥重要作用

塔里木盆地顺北地区钻井资料揭示,位于走滑断裂主位移带上的断面向下切割层位最深,往往具有通源控储的作用,从周邻到主位移带的核心部位,钻井液漏失量有所增加,油气产量也有所增大(云露等,2022)。四川盆地从震旦系到寒武系的高产井均分布在走滑断裂带附近,距离断裂带越近天然气产量越高,表明走滑断裂对碳酸盐岩致密储层具有较好的改造作用(李纯泉等,2024)。鄂尔多斯盆地上古生界致密气开发过程中,发现距离走滑断裂带200~500m的钻井位置最佳,天然气产量明显高于距离走滑断裂带太近或太远的钻井,这表明走滑断裂在对碎屑岩致密储层改造适中的情况下,非常有利于天然气的运聚。这些钻井和断裂带距离与天然气或石油产量之间内在规律的总结应在以后工作中引起重视,这对于井位部署及钻井工程预警具有重要意义。

走滑断裂分层特征为钻井工程领域带来新启示。首先,从塔里木盆地钻井实效来看,走滑断裂带内的正断层上盘往往作为主动盘受应力作用明显,地层破碎严重且易产生钻井液漏失。如上所述,虽然走滑断裂带向下具有切穿整套地层的大规律,但在坚硬的碳酸盐岩和较软的膏盐岩层之间仍有变形上的差异,且往往表现为坚硬地层更易破碎,钻井液更易漏失的特点,这对于钻井工程预警具有重要意义;其次,应重点关注走滑断裂带向下收敛位置所对应的地质层位,这些层位往往是受走滑断裂控制的变形层和不受走滑断裂控制的稳定层或弱变形层之间的分界部位,理论上更易产生“空腔”,也容易造成钻井液的漏失。如鄂尔多斯盆地西南部古峰庄地区的钻井液漏失多发生了下三叠统的刘家沟组、和尚沟组和上二叠统的石千峰组部位,这些地层正好位于中生代走滑断裂带向下收敛的纵向位置,钻井液沿这些地层漏失的比例在该区高达73%(图9)。所以,应将走滑断裂带向下收敛的地层位置作为钻井工程预警的一个关键部位。

6、结论与认识

本文聚焦于我国中西部三大克拉通叠合盆地的走滑断裂分层,通过系统对比和深入分析,取得了以下结论及认识:

(1) 进一步阐明了三大盆地走滑断裂分层的分布特征。本文认为塔里木盆地塔北-塔中地区、四川盆地川中地区、鄂尔多斯盆地西南部主要为走滑断裂分层叠置区,其他区域多为走滑断裂和其他性质断裂的纵向叠置。

(2) 系统总结了三大盆地走滑断裂分层的四种表现形式。分别为大型不整合面是走滑断裂分层的主要分界面;不同构造层之间发育同一走向和不同走向两种分层叠置模

式；同一构造层内也可以发育一定厚度的间隔层；走滑断裂分层发育并不受基底断裂形成及演化控制。

(3) 系统总结了三大盆地走滑断裂分层的两种类型。本文将走滑断裂分层划分为不同构造层间分层和同一构造层内分层两种类型,前一种类型体现了走滑断裂形成演化的受控因素,后一种类型体现了走滑断裂形成过程中的纵向分层构造变形特点,两者共同揭示了克拉通内部走滑断裂形成和演化的特殊性。

(4) 深入分析了克拉通内走滑断裂分层的成因机制。本文认为稳定基底、厚盖层、挤压应力是走滑断裂分层的先决条件;不同期次的挤压应力是不同构造层之间走滑断裂得以分层的根本原因;纵向应力向下衰减和构造环境的变化是同一构造层内走滑断裂得以分层的关键因素。

(5) 进一步明确了走滑断裂分层在油气勘探中的重要作用。走滑断裂分层特征揭示了克拉通叠合盆地内部构造变形的特殊性,这种特殊性可以用纵向上的“构造解耦”来表述,这为地震构造解释提供了全新的理论基础;走滑断裂分层特征揭示了在盆地内部纵向上不同的成藏系统是相对独立的,应用分层勘探的思路是合理的,这为盆地深层勘探提供了新思路;油气容易在走滑断裂带对储层改造适中、源-储之间运移路径畅通的局部区域高产;钻井液多在走滑断裂带向下收敛层位附近发生规模漏失,这为钻井部署和钻井工程具有非常重要的启示和预警作用。

致谢:论文在形成过程中与中国地质大学(北京)何登发教授、长庆油田公司包洪平教授、李斐副院长进行了深入讨论,收获颇多,三位匿名评审专家提出了很多宝贵意见,深受启发,在此一并表示衷心感谢!

7 参考文献

- Heidbach O, Mark T, Andreas B, et al. 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*, 482(1-4): 3-15.
- Liu Y T, Dai S H, Zhou Y J, et al. 2024. Fault characteristics and their control on oil and gas accumulation in the southwestern Ordos Basin. *Energy Geoscience*, 5(1): 100-151.
- Huang L, Liu C Y, Wang Z, et al. 2025a. Abrupt structural deformation changes from the boundary to the interior of a craton basin: Implications for the long-term stability of cratonic blocks. *GSA Bull*, 137:825 - 840
- 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(06): 2039-2066.
- Chen H H, 2023. Advances on Relationship between Strike-Slip Structures and Hydrocarbon Accumulations in Large Superimposed Craton Basins, China[J]. *Earth Science*, 48(06): 2039-2066.
- 陈平, 李明瑞, 李维, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地东部高家堡地区下古生界断裂分层变形特征及形成机制. *石油实验地质*, 46(03): 542-552.
- Chen P, Li M R, Li W, et al. 2024. Characteristics and formation mechanism of stratified

deformation of Lower Paleozoic faults in Gaojiapu area, eastern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology&Experiment*, 46(3):542-552. DOI:10.11781/sysydz202403545.

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(06):1111-1126. DOI 10.16539/j.ddgzyckx.2020.05.015

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[J], *Geotectonica et Metallogenia*, 45(06):1111-1126, DOI: 10.16539/j.ddgzyckx.2020.05.015

段金宝,潘磊,石司宇,等.2023.川东涪陵地区15号走滑断裂带几何学、运动学特征及演化过程研究.地学前缘,30(06):57-68.

Duan J B, Pan L, Shi S Y, et al. 2023, Geometry, kinematic characteristics and evolution of No.15 strike-slip fault zone in Fuling area, eastern Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(6):057-068

冯志强,李萌,郭元岭,等.2022.中国典型大型走滑断裂及相关盆地成因研究.地学前缘,29(06):206-223.

Feng Z Q,Li M,Guo Y L,et al.2022, Genetic analysis of typical strike-slip faults and related basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6):206-223.

DOI:10.13745/j.esf.sf.2022.8.6

付小东,张本健,汪泽成,等.2023.四川盆地中西部走滑断裂及其对油气成藏控制作用.地球科学,48(06):2221-2237.

Fu X D,Zhang B J,Wang Z C,et al,2023,Strike-Slip Faults in Central and Western Sichuan Basin and Their Control Functions on Hydrocarbon Accumulation[J]. *Earth Science*,48(6):2221-2237.

高山.1989.探测地壳深部的信息-联邦德国大陆超深钻计划(KTB)简介.地质科技情报,8(1):51-57.

Gao S. 1989, Observation through continental crust: the continental deep drilling program of the Federal Republic Germany[J]. *Geological Science and Technology Information*, 8(1):51-57.

管树巍,姜华,鲁雪松,等.2022.四川盆地中部走滑断裂系统及其控油气作用.石油学报,43(11):1542-1557.

Guan S W, Jiang H, Lu X S, et al.2022,Strike-slip fault system and its control on oil & gas accumulation in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(11):1542-1557.

DOI:10.7623/syxb202211003

何登发,李德生,童晓光.2010.中国多旋回叠合盆地立体勘探.石油学报,31(05):695-709.

He D F, Li D S, Tong X G. 2010, Stereoscopic exploration model for multi-cycle superimposed basins in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5):695-709.

何登发.2022.中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律.地学前缘,29(06):24-59.

He D F. 2022, Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydrocarbon occurrence[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6):24-59.

DOI:10.13745/j.esf.sf.2022.8.1

何治亮,陆建林,林娟华,等.2022.中国海相盆地原型-改造分析与油气有序聚集模式.地学前缘,29(06):60-72.

He Z L, Lu J L, Lin J H, et al. 2022, Marine basins in China—a prototype-reconstruction analyses and ordered hydrocarbon accumulation patterns[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6):60-72. DOI:10.13745/j.esf.sf.2022.8.4

黄雷,刘池洋,何发岐,等.2022.克拉通盆地内断裂走滑变形特征.西北大学学报(自然科学版),52(06):930-942.

- Huang L, Liu C Y, He F Q, et al, 2022. Strike-slip deformation characteristics of faults in cratonic basins[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 52(6):930-942.
- 黄雷, 刘池洋, 刘永涛, 等. 2025. 鄂尔多斯盆地内部走滑断层分层发育模式及意义. *中国科学:地球科学*, 55(05):1554-1568.
- Huang L, Liu C Y, Liu Y T, et al. 2025. Hierarchical development model and significance of strike-slip faults in the Ordos Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 55(5):1554-1568.
- 焦方正, 杨雨, 冉崎, . 2021. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探. *天然气工业*, 41(08): 92-101.
- Jiao F Z, Yang Y, Ran Q, et al. 2021, Distribution of strike-slip faults and natural gas exploration in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8):92-101.
- 李纯泉, 陈红汉, 唐大卿, 等. 2023. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断裂控制下的“层楼式”油气成藏模式:以震旦系—寒武系为例. *地球科学*, 48(06):2254-2266.
- Li C Q, Chen H H, Tang D Q, et al. 2023, "Storey-style" hydrocarbon accumulation model controlled by strike-slip faults in Gaoshiti-Moxi area of Sichuan Basin: A case study of Sinian-Cambrian[J]. *Earth Science*, 48(6): 2254-2266.
- 梁瀚, 唐浩, 冉崎, 等. 2023. 四川盆地川中地区走滑断裂的分布、类型与成因. *地质学报*, 97(08): 2609-2620.
- Liang H, Tang H, Ran Q, et al. 2023, Distribution, types and genesis of strike-slip faults in central Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(8):2609-2620.
- 刘池洋. 2007. 叠合盆地特征及油气赋存条件. *石油学报*, (01):1-7.
- Liu C Y. 2007, Characteristics of superimposed basins and hydrocarbon occurrence conditions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1):1-7.
- 刘树根, 孙玮, 王国芝, 等 2013, . 四川叠合盆地油气富集原因剖析. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(05): 481-497.
- Liu S G, Sun W, Wang G Z, et al. 2013, Analysis of hydrocarbon enrichment reasons in Sichuan superimposed basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 40(5):481-497.
- 刘卫帅, 刘池洋, 周义军, 等. 鄂尔多斯盆地东部高家堡背斜和相关断裂特征及成因演化. *天然气地球科学*, 2024, 35(10):1800-1815.
- Liu W S, Liu C Y, Zhou Y J, et al. 2024, Characteristics and genetic evolution of Gaojiabao anticline and related faults in eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 35(10):1800-1815.
- 刘永涛, 周义军, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地隐蔽型走滑断裂带构造特征及其油气地质意义. *地质论评*, 2020, 66(S1):90-92.
- Liu Y T, Zhou Y J, Liu C Y, et al. 2020, Structural characteristics and petroleum geological significance of concealed strike-slip fault zones in the Ordos Basin[J]. *Geological Review*, 66(S1):90-92.
- 鲁雪松, 桂丽黎, 汪泽成, 等. 2024. 四川盆地中部走滑断裂活动时间与控藏作用——来自断裂带胶结物 U-Pb 定年和流体包裹体的证据. *石油学报*, 45(04): 642-658.
- Lu X S, Gui L L, Wang Z C, et al. 2024, Activity time of strike-slip faults and their controlling effects on hydrocarbon accumulation in central Sichuan Basin: Evidence from U-Pb dating and fluid inclusions of cements in fault zone[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 45(4):642-658. DOI:10.7623/syxb202404003
- 罗彩明, 梁鑫鑫, 黄少英, 等. 2022. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制. *石油与天*

然气地质, 43(01): 118-131+148.

Luo C M, Liang X X, Huang S Y, et al. 2022, Three-layer structural model and formation mechanism of strike-slip faults in Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 43(1):118-131+148.

马兵山, 梁瀚, 邬光辉, 等. 2023. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化. 石油勘探与开发, 50(02): 333-345.

Ma Bingshan, Liang Han, Wu G H, et al. 2023, Formation and evolution of the multi-stage strike-slip faults in the central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 50(2):333-345. <https://doi.org/10.11698/PED.20220655>

马庆佑, 曾联波, 徐旭辉, 等. 2023. 塔河油田奥陶系走滑断裂体系特征及成因机制. 地质学报, 97(02): 496-506.

Ma Q Y, Zeng L B, Xu X H, et al. 2023, Characteristics and genetic mechanism of the strike-slip fault system in the Ordovician of the Tahe oilfield[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(2):496-506.

莫午零, 计智锋, 姜仁, 等. 西西伯利亚盆地走滑断裂构造特征及其成因机制[J]. 天然气工业, 2024, 44(08):1-12.

Mo W L, Ji Z F, Jiang R, et al (2024). Structural characteristics and genetic mechanism of strike-slip faults in the West Siberian Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 44(8):1-12.

庞雄奇, 周新源, 姜振学, 等. 2012. 叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价. 地质学报, 86(01):1-103.

Pang X Q, Zhou X Y, Jiang Z X, et al. 2012, Formation, evolution and prediction evaluation of hydrocarbon reservoirs in superimposed basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(1):1-103.

汤良杰, 黄太柱, 金文正, 等. 2009. 叠合盆地差异构造变形与油气聚集. 地学前缘, 16(04): 13-22.

Tang L J, Huang T Z, Jin W Z, et al. 2009, Differential structural deformation and hydrocarbon accumulation in superimposed basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(4):13-22.

汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 2001. 叠合盆地构造解析几点思考. 石油实验地质, (03): 251-255.

Tang L J, Jin Z J, Jia C Z, et al. 2001, Some thoughts on structural analysis of superimposed basins[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(3):251-255.

田安琦, 陈石, 余一欣, 等. 准噶尔盆地莫索湾凸起西缘走滑断裂分层变形特征及形成机理. 现代地质, 2023, 37(02):296-306.

Tian A Q, Chen S, Yu Y X, et al. 2023, Hierarchical deformation characteristics and formation mechanism of strike-slip faults on the western margin of Mosuowan Uplift, Junggar Basin[J]. *Geoscience*, 37(2):296-306.

谢和平, 高峰, 鞠杨. 2015. 深部岩体力学研究及探索. 岩石力学与工程学报, 34(11):2161-2178.

Xie H P, Gao F, Ju Y. 2015, Research and exploration on deep rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(11):2161-2178.

杨丽华, 刘池洋, 代双和, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地古峰庄地区断裂特征及油气地质意义. 地球科学进展, 36(10): 1039-1051.

Yang L H, Liu C Y, Dai S H, et al. 2021, Fault characteristics and petroleum geological significance of Gufengzhuang area in Ordos Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 36(10):1039-1051.

叶慧, 石万忠, 王任, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地南部玉都走滑断裂带构造特征及其对油气成藏的控制. 地球科学, 48(06): 2294-2309.

Ye H, Shi W Z, Wang R, et al. 2023, Structural characteristics of Yudu strike-slip fault zone in southern Ordos Basin and its control on hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science*, 48(6):2294-2309.

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(06): 770-787.

Yun L, Deng S. 2022, Differential deformation and reservoir-controlling and accumulation-controlling characteristics of deep strike-slip faults in Tarim Basin: A case study of Shunbei Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(6):770-787.

张驰, 储呈林, 徐勤琪, 等. 2024. 塔里木盆地阿克库勒凸起东南斜坡走滑断裂构造特征及油气地质意义. 地质学报, 98(02): 481-493.

Zhang C, Chu C L, Xu Q Q, et al. 2024, Structural characteristics and petroleum geological significance of strike-slip faults on the southeastern slope of Akekule Uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(2):481-493.

张仲培, 徐勤琪, 刘士林, 等. 2023. 塔里木盆地巴麦地区东段北东向走滑断裂体系特征及油气地质意义. 石油实验地质, 45(04):761-769.

Zhang Z P, Xu Q Q, Liu S L, et al. 2023, Characteristics and petroleum geological significance of NE-trending strike-slip fault system in the eastern segment of Bamai area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(4):761-769.

赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 2007. 中国地应力场分布规律统计分析. 岩石力学与工程学报, (06): 1265-1271.

Zhao D A, Chen Z M, Cai X L, et al. 2007, Statistical analysis of distribution law of in-situ stress field in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(6):1265-1271.

郑和荣, 胡宗全, 云露, 等. 2022. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用. 地学前缘, 29(06): 224-238.

Zheng H R, Hu Z Q, Yun L, et al. 2022, Development characteristics and reservoir-controlling effect of internal strike-slip faults in marine cratonic basins of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6):224-238.

周义军, 刘池洋, 代双和, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地内部走滑断裂特征及控藏作用研究. 石油工业出版社.

Zhou Y J, Liu C Y, Dai S H, et al. 2023, Characteristics and reservoir-controlling effect of internal strike-slip faults in the Ordos Basin[M]. Petroleum Industry Press.

包洪平, 邵东波, 郝松立, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化. 地学前缘, 26(01):33-43.

Bao H P, Shao D B, Hao S L, et al. 2019, Basement structure and early sedimentary cover evolution of Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(1):33-43.

闫磊, 李明. 2013. 基于高精度重磁资料的塔里木盆地基底隐伏断裂识别//中国地球物理学会. 中国地球物理-第二十专题论文集. 中国石油勘探开发研究院, 60-61.

Yan L, Li M. 2013, Identification of concealed basement faults in Tarim Basin based on high-precision gravity and magnetic data[C]//Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 20th Special Topic of Chinese Geophysics. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 60-61.