

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

刘雨晴¹, 邓尚^{1,2}, 张荣², 刘军², 黄诚², 高天³

[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;
3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083]

摘要:为加深对塔里木盆地顺北地区岩浆侵入作用的研究,运用研究区丰富的三维地震资料,在详细刻画火成岩侵入体及相关构造发育特征和展布规律的基础上,建立了岩浆的垂向侵入模式,确立了岩浆的侧向流动方向,探讨了其石油地质意义。结果表明,顺北地区的碟形火成岩侵入体一般沿中、下奥陶统顶界面及以上界面层状叠置分布,碟形岩床之上发育逆断层和高陡裂隙两类构造,由此自下而上形成了“岩浆通道-叠置岩床-高陡构造”的岩浆垂向侵入模式。碟形岩床及相关构造的展布特征表明,该区岩浆自深部侵入到中、下奥陶统顶界面之后自北向南呈放射状侧向流动。研究火成岩侵入体对储层的改造作用和相关逆断层对油气的运聚作用有利于开拓顺北地区乃至整个塔里木盆地的油气勘探新领域。

关键词:逆断层;高陡裂隙;火成岩侵入体;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2 **文献标识码:**A

Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei area, Tarim Basin

Liu Yuqing¹, Deng Shang^{1,2}, Zhang Rong², Liu Jun², Huang Cheng², Gao Tian³

[1. *Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*; 2. *Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China*; 3. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*]

Abstract: The magma intrusion in the Shunbei area, Tarim Basin, is investigated based on newly acquired 3D seismic data. The igneous intrusions and related structures in the area are characterized and mapped in detail to establish a vertical intrusion model, determine lateral flow direction of magma, and reveal their petroleum significance. The igneous intrusions are saucer-shaped and distribute along the top boundary of the Lower-Middle Ordovician and the boundaries of strata above it in layered superimposition. Reverse faults and steep fractures occur above the saucer-shaped sills, leading to a vertical magma intrusion model of “magma pathway-superimposed sills-steep structure”. The actual distribution of the sills and related structures reveal that the magma in this area first intruded from the deep to the top of the Middle-Lower Ordovician and then flew laterally from north to south in a radial pattern. All these suggest that igneous intrusions play a role in improving reservoir quality and the related reverse faults are the pathways for hydrocarbon to migrate. A deeper understanding of the sills and related structures can be a better guidance for oil and gas exploration in the Shunbei area or even the whole Tarim Basin.

Key words: reverse fault, steep fracture, igneous intrusion, Shunbei area, Tarim Basin

引用格式:刘雨晴,邓尚,张荣,等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 105-117. DOI: 10.11743/ogg20220109.

Liu Yuqing, Deng Shang, Zhang Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 105-117. DOI: 10.11743/ogg20220109.

收稿日期: 2020-11-16; 修订日期: 2021-12-09。

第一作者简介: 刘雨晴(1990—), 女, 博士, 构造地质学。E-mail: liuyqsmile@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U21B2063); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003)。

岩浆侵入是研究内动力地质作用的重要内容,也是地壳构造变动的重要力学机制之一。岩浆侵入过程中,在形成多种形态的火成岩侵入体的同时,还会派生出大量次级构造。这些火成岩侵入体与相关构造的发育特征及其内在联系,不仅是揭示岩浆活动过程的关键证据,同时也与油气运聚成藏密切相关,对油气勘探具有指导意义^[1-6]。

顺北地区位于塔里木盆地中央隆起带北部,自古生代以来岩浆活动频繁^[7-10]。随着油气勘探开发的不断推进和地震资料品质的不断提升,越来越多的资料显示在该区深层上古生界发育有大量火成岩侵入体和相关构造。然而,目前对于这些深层火成岩侵入体及相关构造尚无系统研究,制约了对塔里木盆地岩浆侵入过程的认识,影响了该区的勘探开发进程。

鉴于此,本文利用顺北地区西部采集的最新三维地震资料,对火成岩侵入体及相关构造的发育特征及展布规律进行了精细地震-地质解析。在此基础上建立了岩浆的垂向侵入模式,确立了岩浆的侧向流动方向,探讨了其石油地质意义。本研究在深化对塔里木盆地岩浆侵入动力学过程认识的同时,还可为开拓塔里木盆地油气勘探领域提供指导,兼具理论和实践意义。

1 地质背景

1.1 地质概况

塔里木盆地顺托果勒低隆北邻塔北隆起,南接卡塔克隆起,东西向位于阿瓦提坳陷与满加尔坳陷之间,相比南北两大隆起是相对稳定的古构造单元。顺北地区主体位于顺托果勒低隆北部,古生界发育相对齐全,其中寒武系—中奥陶统发育约3 000 m厚的海相碳酸盐岩,上奥陶统发育约2 000 m厚的泥岩,志留系至石炭系以分布广泛的碎屑岩为主^[11](图1)。顺托果勒低隆自古生代以来经历了多阶段的构造演化活动:加里东早期(寒武纪—中奥陶世)克拉通边缘拗拉槽和克拉通内弱伸展阶段,加里东中、晚期—海西早期(晚奥陶世—中泥盆世)克拉通隆起形成演化与整体挤压阶段,海西中晚期—印支期(石炭纪—侏罗纪)随塔北隆起持续抬升阶段,燕山期—喜马拉雅期持续埋深和构造定型阶段^[11-13]。

1.2 断裂特征

顺北地区发育大量走滑断裂体系,基于现有地震

资料可识别出18条主干走滑断裂,其中以顺北5号断裂为界呈现“东西分区”的展布特征:以东主要发育NE向断裂体系,以西主要发育NW向断裂体系(图1)。顺北地区的走滑断裂普遍具有“纵向分层”和“平面分段”特征^[11,14-17]。纵向分层是指以中、下奥陶统顶面 T_4^+ 界面为界,下伏陡直走滑段(主滑移层),上覆雁列正断层(雁列层)。该界面是中、下奥陶统碳酸盐岩与上奥陶统、志留系等碎屑岩层系之间的重要岩性界面。平面分段是指走滑断裂在中、下奥陶统顶面(T_4^+ 界面)并非线性连续延伸,而是沿走向表现为多个断面,在断面的叠接部位可形成拉分段和隆起段,非叠接部位为平移段。受控于多期次区域构造事件的发生,该区走滑断裂整体经历了3期演化过程:加里东中期Ⅲ幕的斜压活动,以压脊变形为主,在 T_4^+ 界面呈现分段性;加里东晚期—海西早期以及海西中、晚期均为斜拉或纯剪切,以雁列正断层活动为特征^[14-17]。

顺北11号断裂位于顺北5号断裂西侧中国石化矿区内,由北(S1)和南(S2)两块三维区覆盖,断裂整体走向为NW向(图1)。在S1三维区采集了最新数据并处理,地震数据品质较高,可见典型的火成岩侵入现象,因此将S1三维区作为本文的重点研究区。通过提取S1三维区不同层系的相干切片可见顺北11号带北段在 T_4^+ 界面及以下断面清晰,呈线性延伸(图2)。 T_4^+ 界面表现为北压隆、南拉分的分段叠接结构(图3a); T_4^+ 界面以上地震成像因受到大量火成岩的干扰而不清晰,上覆雁列正断层难以识别(图2,图3a)。S2三维区数据显示,顺北11号带南段 T_4^+ 界面发育拉分叠接段, T_4^+ 界面以上较北段反射特征清晰,发育明显的雁列正断层(图3b)。

1.3 岩浆活动背景

塔里木盆地经历了震旦纪—寒武纪、晚奥陶世—志留纪、二叠纪和白垩纪等4期岩浆活动,尤以二叠纪岩浆活动最为剧烈、规模最大^[18]。就塔中地区而言,西部在早二叠世发生的大规模火山喷发和岩浆侵入事件形成了厚度不一、分布广泛的基性岩浆岩,具有顺层分布的特征,在远离火山通道的地区形成了大量的小型岩床^[7-8,18]。其岩浆活动遵循如下规律:初期,岩浆活动剧烈,形成分布面积广、厚度大的裂隙式喷发岩体;晚期,岩浆活动减弱,形成分布相对局限、厚度薄的中心式喷发岩体;末期,几乎全为由岩浆分异形成的酸性热流体产生的热液活动,形成脉体^[19]。前期研究普遍认为,该地区岩浆活动受控于断裂,岩浆以断裂为通道,顺断层侵入或者沿断层喷发至地表^[20]。

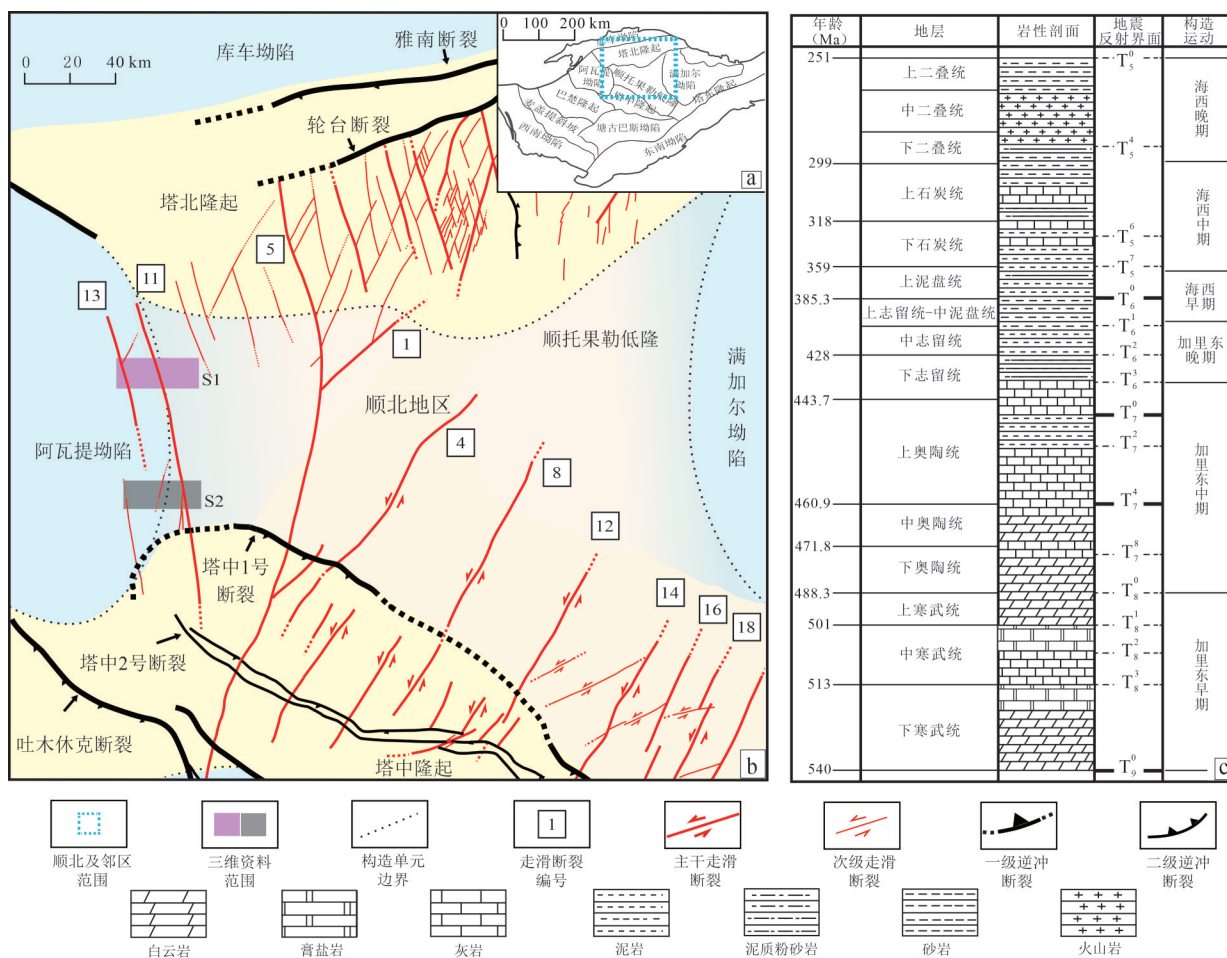


图 1 塔里木盆地顺北及邻区下古生界断裂分布及地层格架 (据文献[14]修改)

Fig. 1 Distribution of major faults and stratigraphic framework of the Lower Paleozoic in the Shunbei area and periphery, Tarim Basin

a. 塔里木盆地构造单元; b. 顺北及邻区下古生界断裂分布; c. 顺北及邻区地层格架

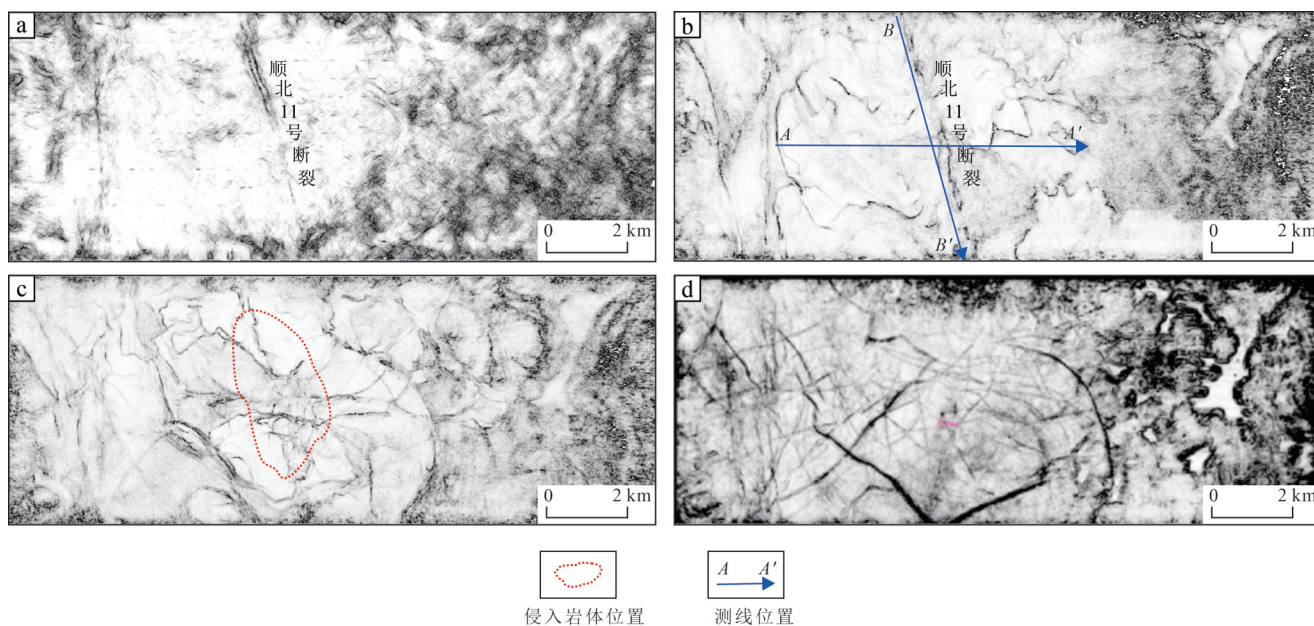


图 2 塔里木盆地顺北地区 S1 三维区不同层系相干切片 (三维区位置见图 1)

Fig. 2 Coherence slices of various reflecting interfaces for S1 3D acreage in Shunbei area, Tarim Basin (see Fig. 1 for the location of S1)

a. T_9^0 界面; b. T_7^1 界面; c. T_7^0 界面; d. T_6^0 界面

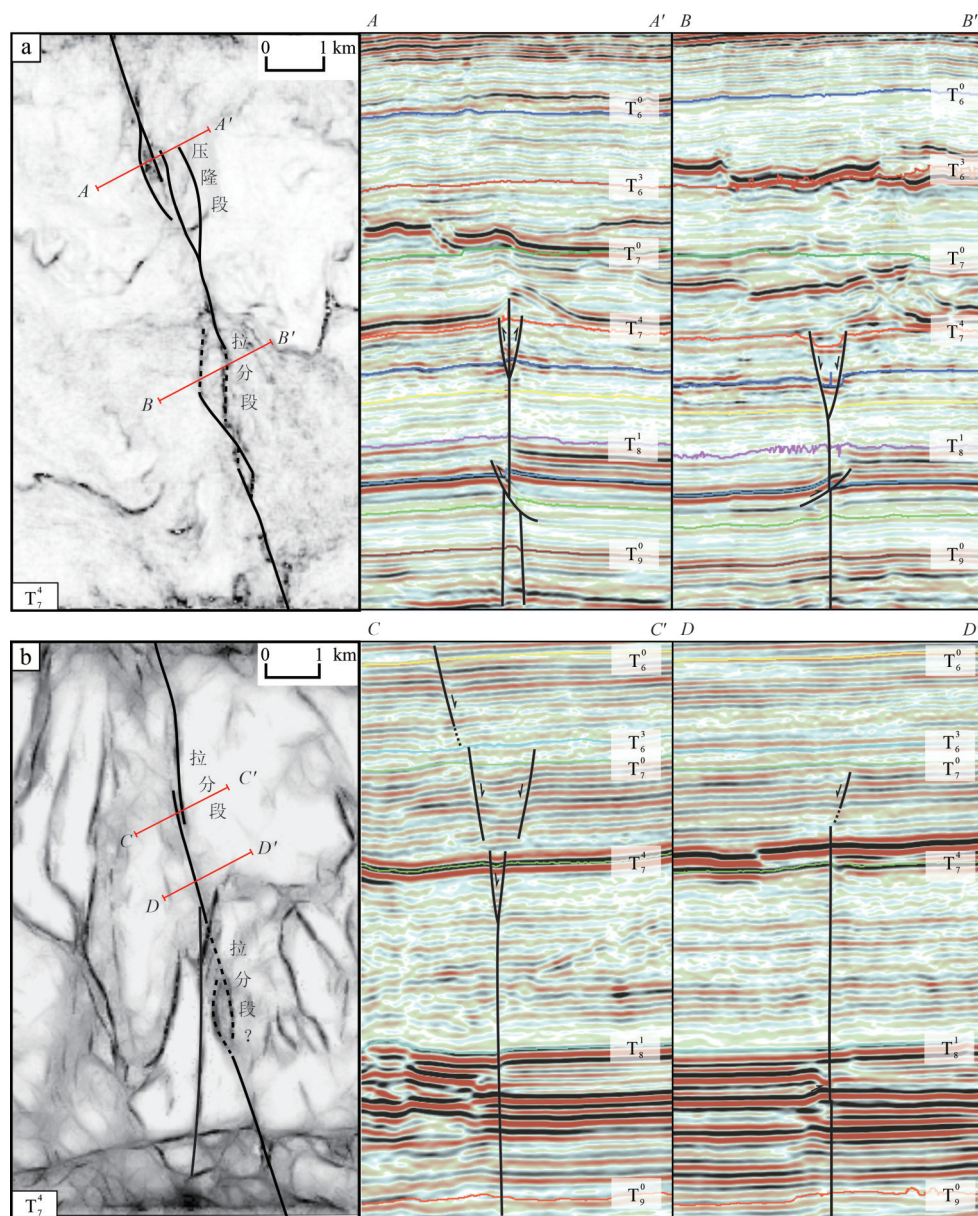


图3 塔里木盆地顺北地区11号断裂平面分段及垂向分层结构特征

Fig. 3 Lateral segmentation and vertical layering of No. 11 fault on the top of the Middle-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin

a. 断裂北段; b. 断裂南段

2 火成岩侵入体特征

2.1 基本形态

在顺北地区,岩浆自深部运移至上奥陶统底界面(T_4^1 界面)后开始发生侧向流动,形成侵入岩体。岩浆的侵入模式以顺层侵入为主。侵入体和围岩之间存在强波阻抗差异,在地震剖面上表现为与沉积地层近平行的强轴反射特征。该强反射轴侧向连续性差,在两端往往向上斜切地层形成倾斜岩脉,在空间上呈碟形岩床形态(图4)。

碟形岩床是岩浆侵入的典型基本空间形态之一,在多个岩浆活动剧烈地区的野外露头 and 地震剖面上均有识别^[21-28]。完整碟形岩床的基本组成单元包括供给岩脉、内部岩床、倾斜岩脉和外部岩床^[28](图4)。供给岩脉是指可为上部地层发生顺层侵入提供岩浆来源的岩脉。内部岩床是指岩浆顺层侵入后形成的较为平坦的岩体。倾斜岩脉是指内部岩床侧向延伸终止后岩浆斜切地层形成的岩脉。外部岩床则是倾斜岩脉向上侵入受阻后在合适的界面发生单边、小规模顺层侵入形成的岩床,往往不发育。碟形岩床上部地层发生隆起。

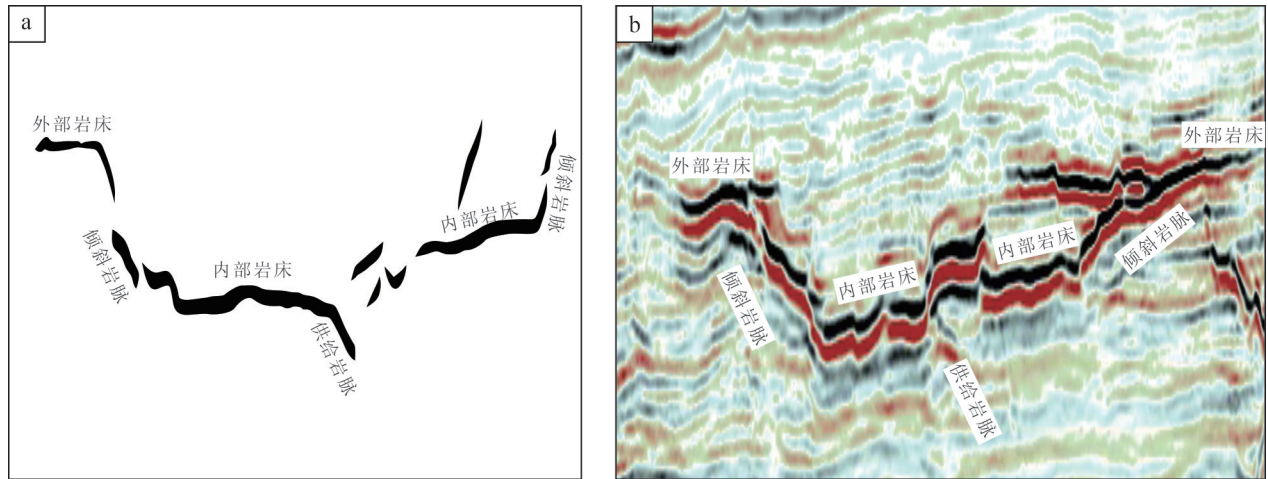


图4 塔里木盆地顺北地区碟形岩床基本组成单元及典型剖面

Fig. 4 Basic elements and a typical seismic profile of saucer-shaped sills

a. 碟形岩床基本组成单元(引自文献[28]); b. 碟形岩床典型地震剖面

2.2 空间展布

纵向上,地震剖面揭示火成岩侵入体自 T_7^4 界面(上奥陶统底界面)开始出现,主要分布在上奥陶统一志留系之间,呈纵向叠置(图5)。 T_7^4 界面是顺北地区古生界一个重要的岩性分界面,同时也是该区走滑断裂由“下伏陡直走滑段”开始向“上覆雁列正断层”分层发育的界面^[14-17]。由于该界面上下岩性差异巨大,因此在全区普遍表现为强振幅连续反射。但是在侵入体发育的地区,地震轴开始出现反射杂乱、连续性变差,与同样是强振幅反射的火成岩侵入体难以区别。此外还可以观察到有大量倾斜岩脉从 T_7^4 界面向上侵入。由此可见, T_7^4 界面是岩浆自深部上涌后开始发生顺层侵入的重要界面。

横向上,自北向南,侵入岩体的展布存在4个明显的变化:侵入岩体数量增多、侵入层位增加、侵入高度增大和隆起幅度增强(图6)。北部可识别的典型侵入体有两套,集中在 $T_7^4-T_7^0$,岩床上覆地层无明显隆起。向南部可识别的典型侵入体超过5套,侵入层位多,向上可侵至 T_6^0 ,岩床上覆地层存在明显的隆起变形。除了上述整体变化规律以外,就11号断裂带的北部压隆段和南部拉分段位置而言,侵入岩体发育也存在明显的差异。北部压隆段处, T_7^4 界面地震轴振幅清晰且连续, $T_7^4-T_7^0$ 内部为空白弱反射,仅有少量倾斜岩脉从 T_7^4 界面向上侵入,揭示了较弱的岩浆侵入活动(图7a)。南部拉分段处, T_7^4 界面地震轴连续性差, $T_7^4-T_7^0$ 内部反射杂乱,有大量倾斜岩脉自 T_7^4 向上侵入,揭示剧烈的岩浆侵入活动(图7a)。通过对比可见,走滑断裂的拉分段更易成为岩浆的上涌通道。

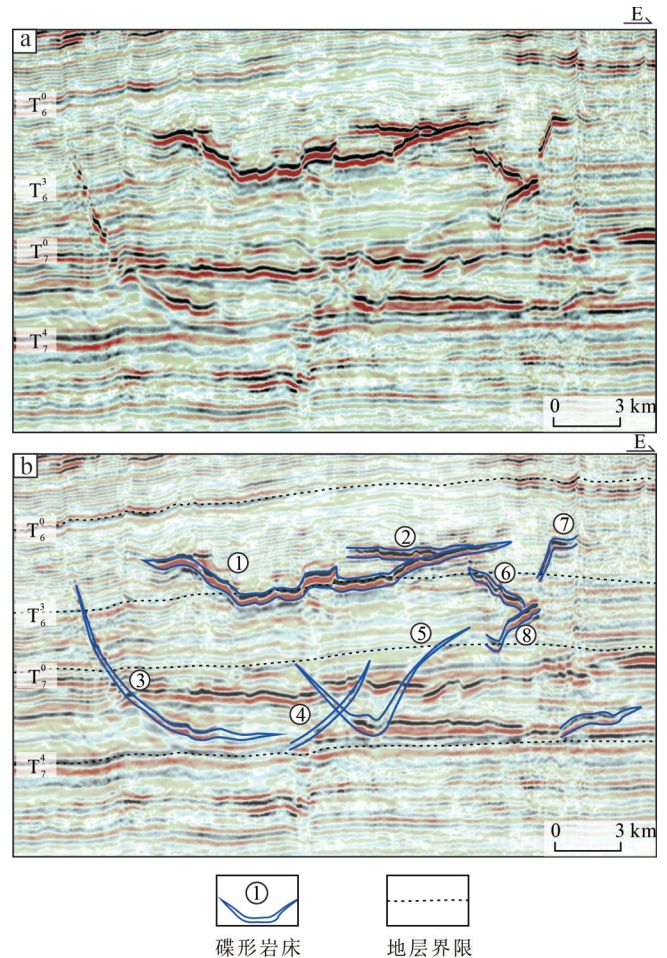
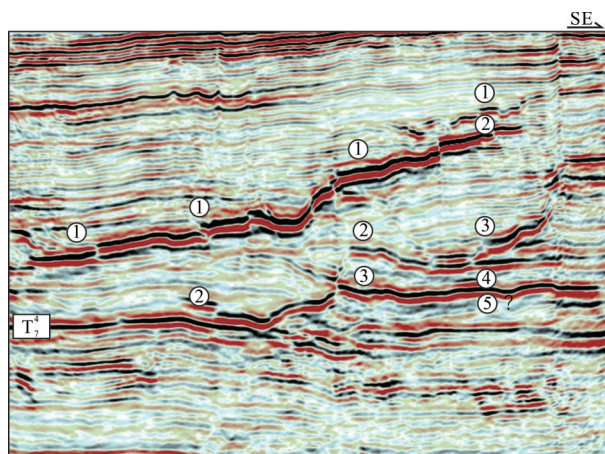


图5 塔里木盆地顺北地区碟形岩床纵向叠置特征(剖面位置见图2A—A')

Fig. 5 Seismic profile showing vertical superimposed saucer-shaped sills in the Shunbei area, Tarim Basin (see AA' in Fig. 2 for the location)

a. 未解析地震剖面; b. 已解析地震剖面

这是由于拉分段的断裂为正断层,空腔大、开启性好,易控制岩浆房的发育,从而成为热液的优势运移通道。



① 侵入岩体编号

图6 塔里木盆地顺北地区自北向南侵入岩体地震剖面
(剖面位置见图2B—B')

Fig. 6 Seismic profile showing distribution of sills from north to south in the Shunbei area, Tarim Basin
(see BB' in Fig. 2 for the location)

3 火成岩侵入体相关构造

研究区的 T_7^0 、 T_6^0 和 T_5^0 地震反射界面的相干切片揭示了大量错综复杂的线性构造,明显不同于下伏走滑断裂,也不似雁列正断层组合。通过对该类构造的精细解剖,明确了其主要包括逆断层和高陡裂隙两类构造(图8),且均与火成岩侵入相关。

3.1 高陡逆断层

地震剖面显示,上奥陶统—二叠系中发育数条断面清晰、与下伏走滑断裂特征不同的高陡逆断层。该类逆断层发育在碟形岩床上方,是碟形岩床形成引起地层隆起的边界断裂。逆断层向下终止于碟形岩床倾斜岩脉的末段,向上切至 T_5^4 界面(下二叠统顶面)。断层倾向与下伏倾斜岩脉一致。断面下部平直,顶部发生弯曲并伴随小型正断层的发育,形成Y字型组合(图9a)。

平面上,逆断层走向以NW走向为主,少量NE走向。断裂行迹较弯曲,同一根断裂常呈现走向变化,或

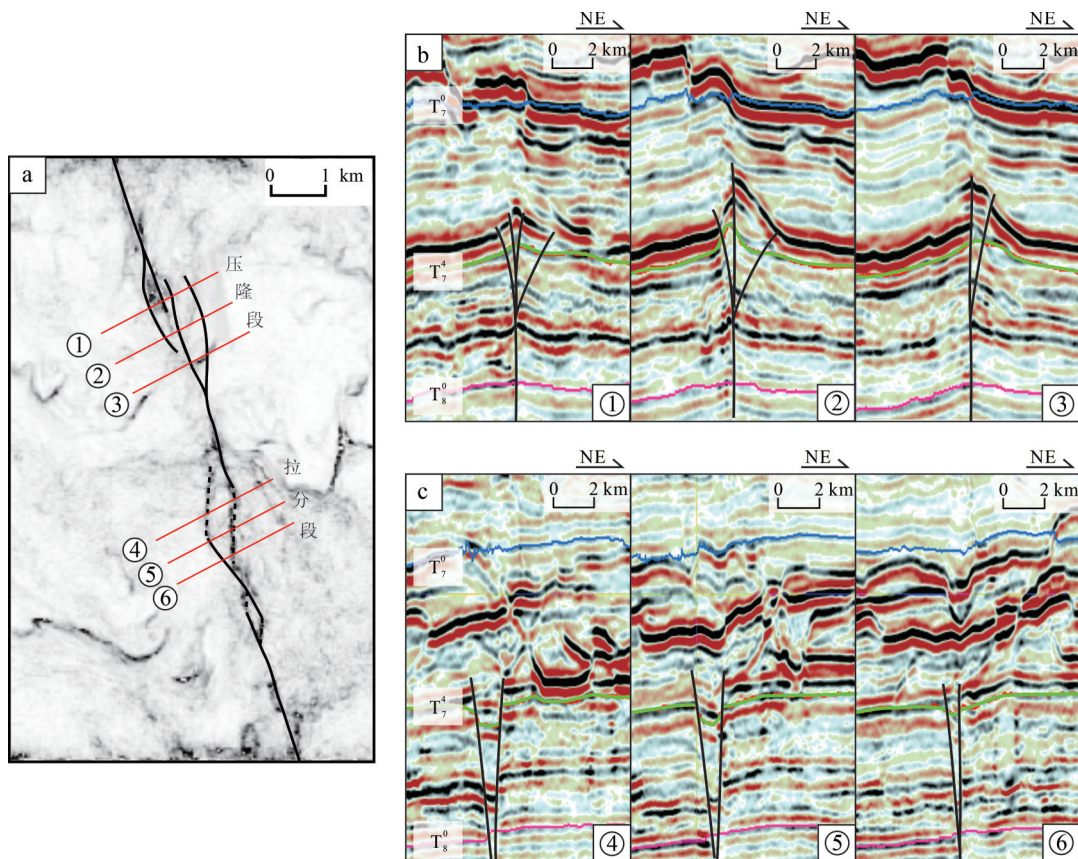


图7 塔里木盆地顺北地区11号断层不同分段之上侵入岩体特征

Fig. 7 Seismic profile showing the characteristics of sills above different segments of No. 11 fault in Shunbei area, Tarim Basin
a. T_7^4 界面分段特征; b. 压隆段典型剖面; c. 拉分段典型剖面

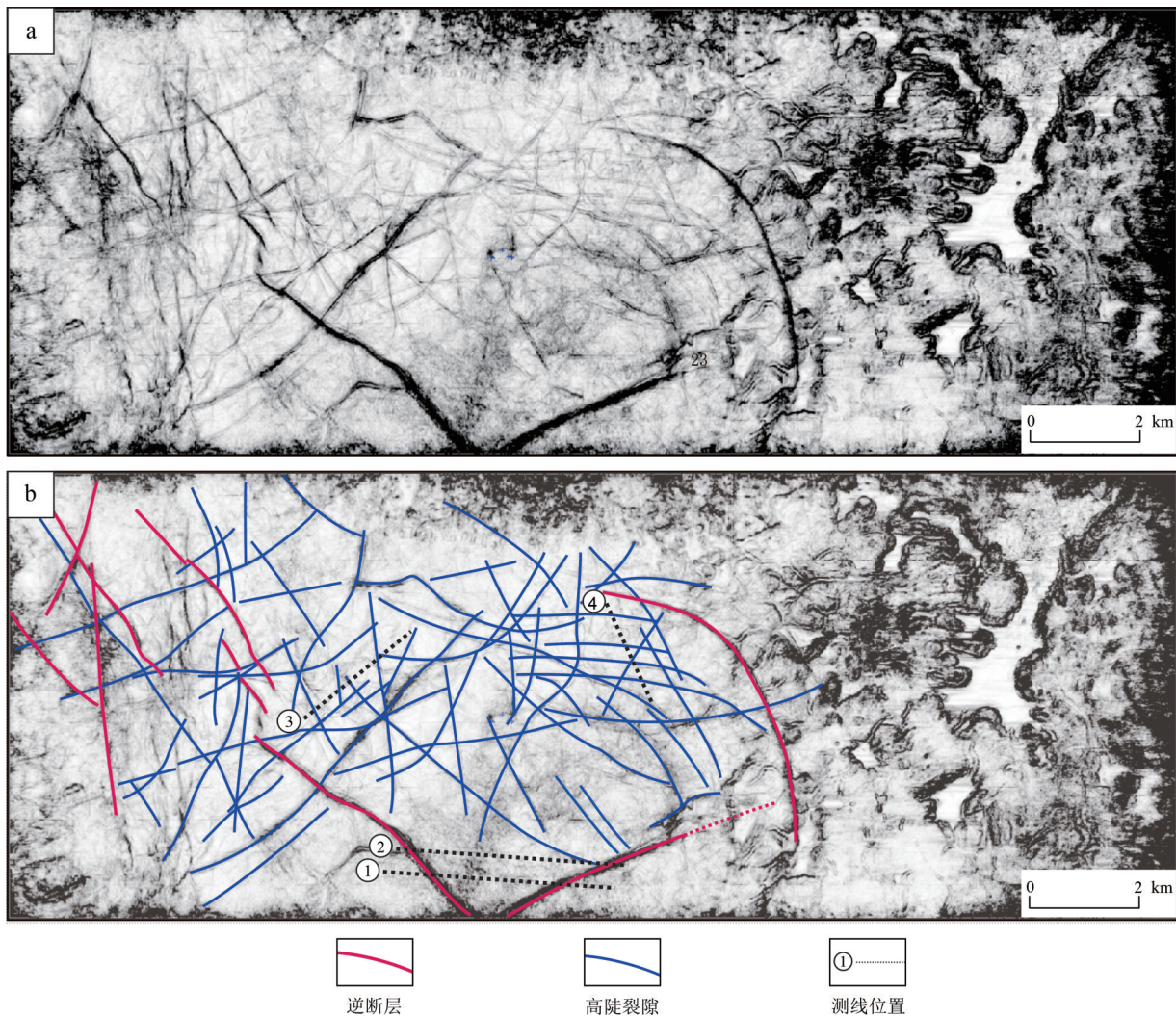


图8 塔里木盆地顺北地区 T_6^0 界面火成岩相关构造平面展布特征

Fig. 8 Planar distribution of igneous related structures on interface T_6^0 in the Shunbei area, Tarim Basin

a. 解释前; b. 解释后

折角突变,或弧形渐变(图8)。

从走向、分布、构造样式和发育位置等特征来看,逆断层与该区的走滑断裂之间无明显成因联系,但与火成岩侵入体的发育密切相关。逆断层两侧地层的变形特征揭示,该类断裂活动于中二叠世,即海西中、晚期。该时期,由于古特提斯洋向北俯冲,使已经成为欧亚大陆南缘的塔里木板块处于弧后伸展环境,顺北地区走滑断裂受斜拉应力场的影响表现为雁列正断层^[14-17]。而火成岩相关的逆断层走向没有明显规律,可以很直,也可以成为弧形,完全受控于倾斜岩脉的分布。这些倾斜岩脉的形成时间与逆断层的形成时间相对一致,为中、晚二叠世。证据包括3个方面:①从区域构造背景来看,此时塔里木板块深部地幔热物质上涌,并伴随了大规模岩浆侵入和喷发^[9];②顺北地区多口钻井在二叠系中钻遇的大量基性玄武岩和中酸性英

安岩等熔岩的形成时间亦为中、晚二叠世,符合此时的岩浆活动背景^[8];③顺北11号断裂上的钻井在上奥陶统一志留系内钻遇多套侵入岩体,岩性以辉绿岩为主,与顺2井上奥陶统良里塔格组辉绿岩类似,后者经“ $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ”快中子活化法测年结果为中二叠世^[20]。由此可见,该类逆断层并非构造成因产物,与主干断裂的发育和演化无必然联系,而是与此时频繁的岩浆活动密切相关。大量的物理模拟和数值模拟证实,岩脉在脆性岩层中顺层侵入时,侵入前端随着岩浆厚度的不断增加而容易形成剪切破裂,岩浆进而沿着剪切破裂侵入形成倾斜岩脉^[26],同时伴随岩床上覆地层隆起,当隆起幅度增大,地层即发生破裂形成逆断层^[27](图9c)。部分学者称之为边缘断层。断裂顶部附近的正断层则是因为隆起顶部发生地层垮塌而形成的^[27]。

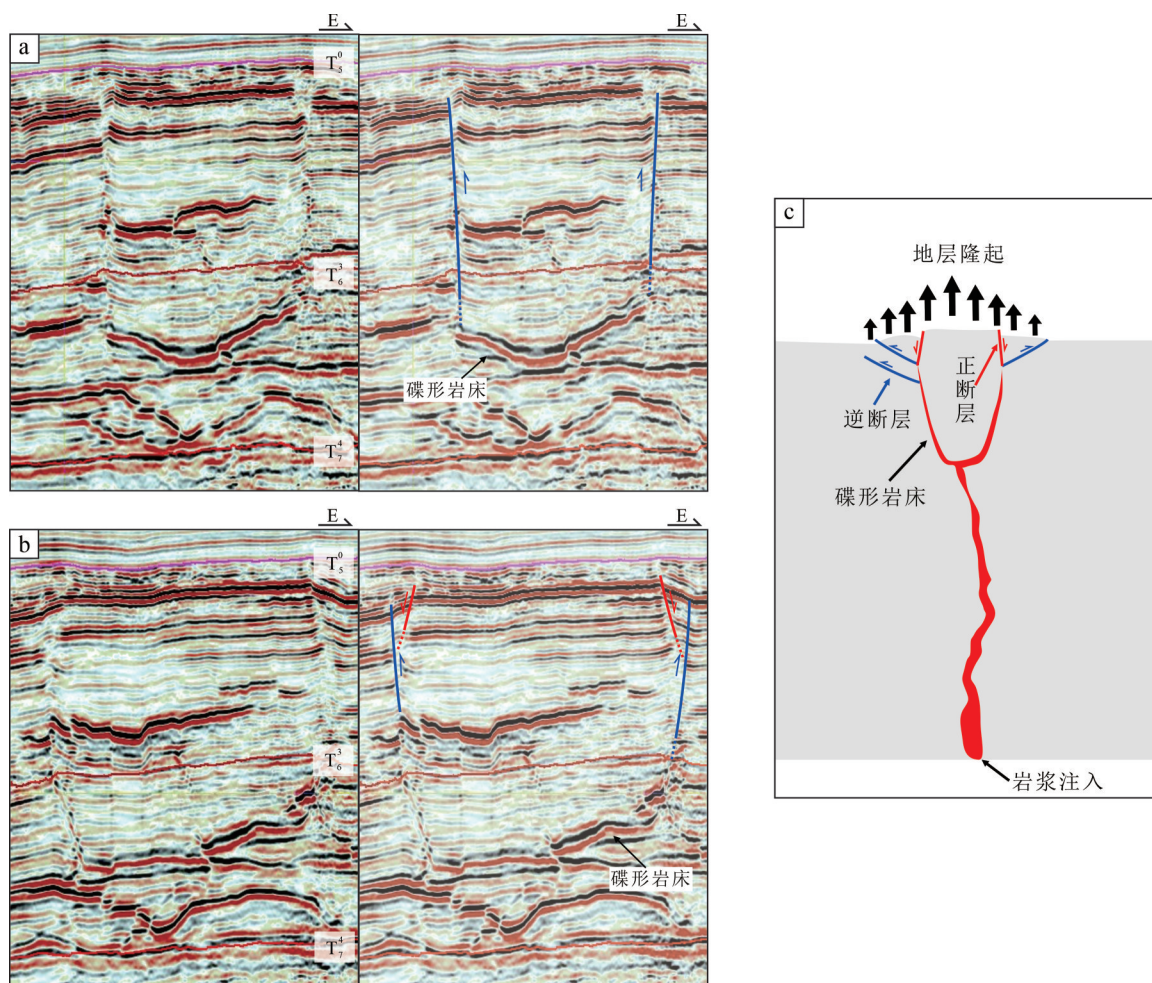


图9 塔里木盆地顺北地区火成岩相关逆断层的剖面特征及成因机制

Fig. 9 Seismic profiles (a and b) showing the characteristics of igneous related reverse faults and a diagram showing the genesis of the faults (c), Shunbei area, Tarim Basin

a. ①号测线(位置见图8); b. ②号测线(位置见图8); c. 成因机制(引自文献[27])

3.2 高陡裂隙

高陡裂隙主要发育在岩床错断处上方,表现为地层的轻微褶曲。平面上,高陡裂隙数量非常多,走向包括NW, NE和近EW向,成棋盘状交错展布(图8)。平面构造形迹或平直,或弯曲,剖面变形明显弱于逆断层,高陡裂隙倾角在 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$,主要发育层系为志留系—石炭系(图10)。在北海盆地的碟形岩床之上也可大量识别出此类构造^[28]。

4 讨论

4.1 岩浆垂向侵入模式

岩浆侵入往往形成一个纵向相关的垂向侵入系统^[21]。基于研究区火成岩侵入体及相关构造发育特

征的分析,可以建立岩浆的垂向侵入模式。该区岩浆垂向侵入模式自下而上由“岩浆通道、叠置岩床和高陡构造”3部分组成(图11)。

虽然逆断裂的形成与主干断裂无关,但是岩床的形成普遍受张性断裂控制^[21]。海西中、晚期,顺北地区寒武系—中、下奥陶统发育的走滑断裂斜拉环境下复活,发生张扭,成为岩浆垂向侵入的主要通道。由于碟形岩床多孤立存在,远距离顺层侵入的可能性不大,因此垂向的岩浆通道多出现在岩床下方。

岩浆自深部沿高陡走滑断裂垂向侵入奥陶系,在 T_4^1 岩性界面发生侧向流动,形成碟形岩床。碟形岩床的倾斜岩脉上侵过程中可作为供给岩脉^[22],在合适层面侧向流动继续形成碟形岩床,形成层层供给、垂向叠置的岩床展布,岩床形成过程中引起上覆地层隆起,在倾斜岩脉上方形成边缘逆断层,在岩床上方形成大量的高陡裂隙。

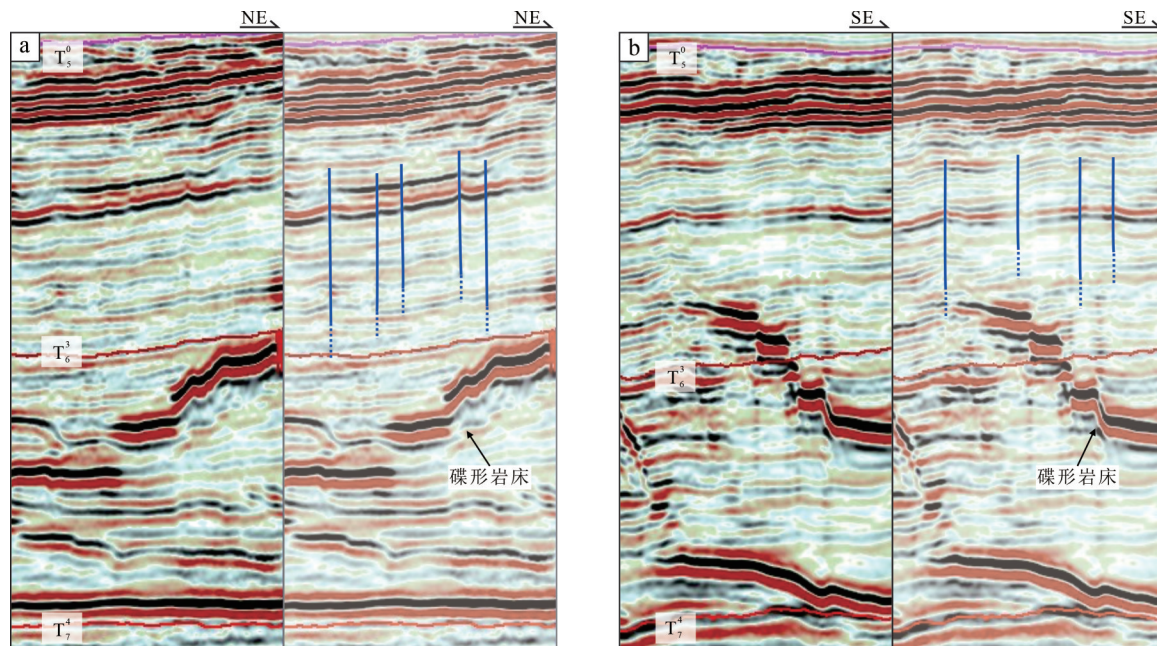


图 10 塔里木盆地顺北地区火成岩相关高陡裂隙剖面特征

Fig. 10 Seismic profiles showing the characteristics of igneous related steep fractures, Shunbei area, Tarim Basin

a. ③号测线(位置见图 8); b. ④号测线(位置见图 8)

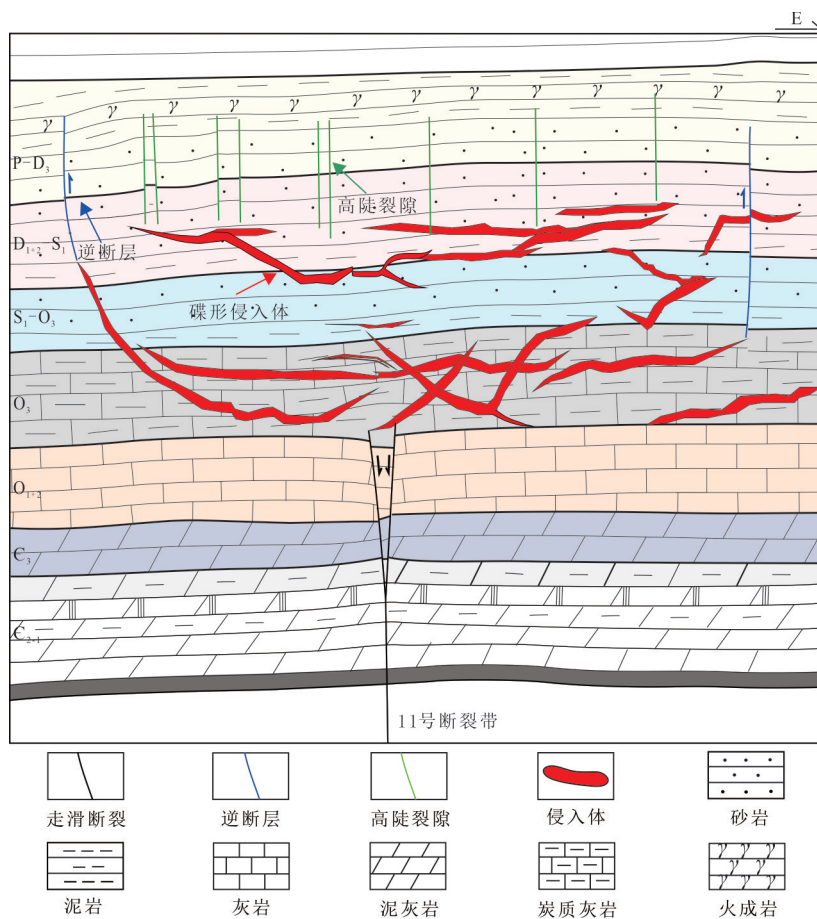


图 11 塔里木盆地顺北地区岩浆垂向侵入模式

Fig. 11 Diagram showing a vertical magma intrusion model in the Shunbei area, Tarim Basin

4.2 岩浆侧向流动方向

岩浆自深部沿着断裂垂向涌入后,在合适地层界面侵入并发生侧向流动。受到流体密度差异、地层岩性和物性差异等多种因素的制约,岩浆并不能均匀铺开,而是存在一个优势流动方向。通过大量国内外文献调研,总结了4种研究岩浆流动方向的方法:①利用岩石样品中的稀有气体同位素变化判断^[29];②利用不同尺度的剩余重力异常中心的位置与出露岩体中心的位置判断^[30];③利用侵入岩体的空间形态判断^[22]和④利用火成岩相关构造展布特征判断^[22]。由于塔里木盆地的岩浆侵入体分布在深层,缺少岩石样品和露头资料,因此本文采用后面两种方法对研究区的岩浆侧向流动进行判定。

利用侵入岩体的空间形态判断:研究揭示,岩浆在侧向流动过程中,前缘会逐渐分离,形成指状展布^[22]。根据这种空间展布形态即可判断出岩浆的侵入方向(图12a)。本文选取三维区内发育较为完整、反射特征清晰的一个碟形岩床进行精细地震追踪和插值加密后,获得了该侵入体的空间形态展布特征,为侵入体南端的指状展布,揭示了岩浆侧向流动方向为自北向南流动(图12b)。

利用火成岩相关构造展布特征判断:火成岩相关构造的展布方向和组合方式可指示岩浆的侵入方向。岩浆侵入过程中,逆断层和高陡裂隙的发育以两组方向为主,呈棋盘格状方式组合,逆断层的方向与侵入方向垂直,高陡裂隙的构造方向则与侵入方向平行^[22](图13a)。就研究区而言,火成岩相关构造组合方式自西向东有所差异:东、西两侧表现为NE向与NW走

向的组合方式,其中东侧的逆断层为NW向,西侧的逆断层为NE向;中部的为近NS向+近EW向组合。根据这种构造组合特征,可以推断岩浆流动方向在西侧为NW向、中部为近NS向、东侧为NE向(图13b)。

综合上述两种判识方法,最终认为该区岩浆的流动方向为自北向南呈放射状散开。

4.3 石油地质意义

对顺北地区的勘探在包括奥陶系、志留系和白垩系在内的多个层系均见到油气显示或获得工业油流。该地区油气以垂向输导为主,即油气源自于深部寒武系烃源岩,沿断穿基底的通源主干断裂垂向运移,不仅能够在中、下奥陶统聚集成藏,也可向上输导至多个层系,初现立体含油格局。

下古生界奥陶系碳酸盐岩内走滑断控油藏是顺北地区油气勘探开发的主要目标。岩浆自深部沿走滑断裂向上侵入的过程中,因携带了地壳深部的酸性热液流体,会对碳酸盐岩储层产生萤石化作用、热液白云岩化作用、溶蚀作用和大理岩化作用^[31],从而大幅度提高储层孔隙度、改善储集性能。

上古生界碎屑岩内岩性及构造油藏一直是顺北地区油气勘探的重要目标类型,但目前获得油气突破的井不多。前文提及该区碟形岩床就发育在上古生界碎屑岩内,岩床形成引起上覆地层上隆的过程中,隆起顶部受张力影响形成大量张裂缝,同时边缘逆断裂活动也会形成空腔和裂缝,这些均可大大增强碎屑岩的储集性能。此外,该区钻井资料揭示数十米的碟形岩床之上多存在1~2 m的脆性蚀变泥岩,可见火成岩侵入体对围岩产生烘烤能够改善储集体性能^[32-36]。火成岩

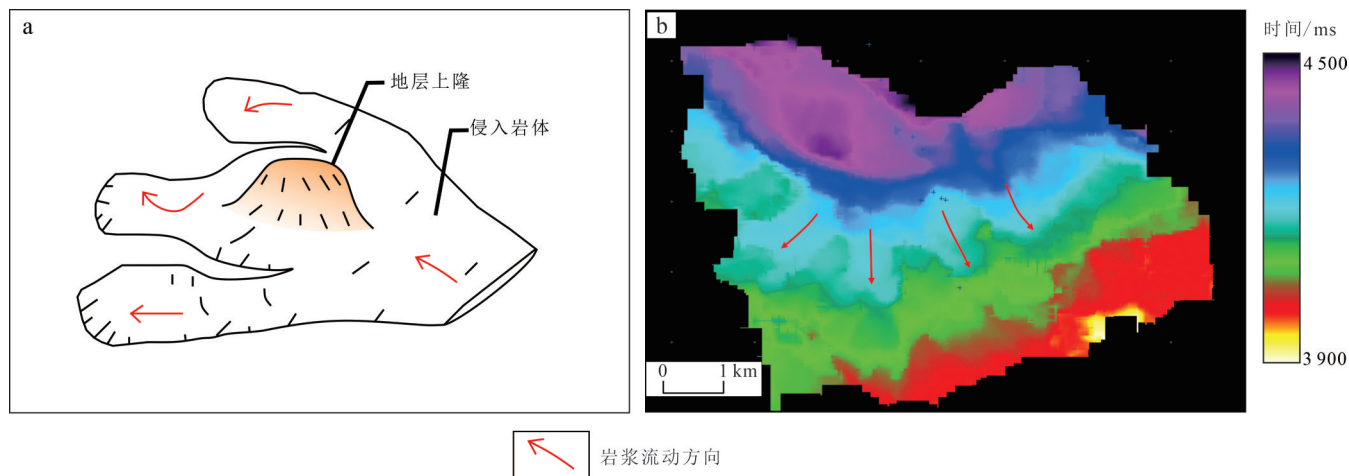


图12 火成岩侵入岩体空间形态揭示岩浆流动方向的原理

Fig. 12 Magma flow direction revealed by the spatial morphology of igneous intrusions

a. 岩浆侵入体侧向流动原理(引自文献[22]); b. 研究区典型碟形岩床刻画实例

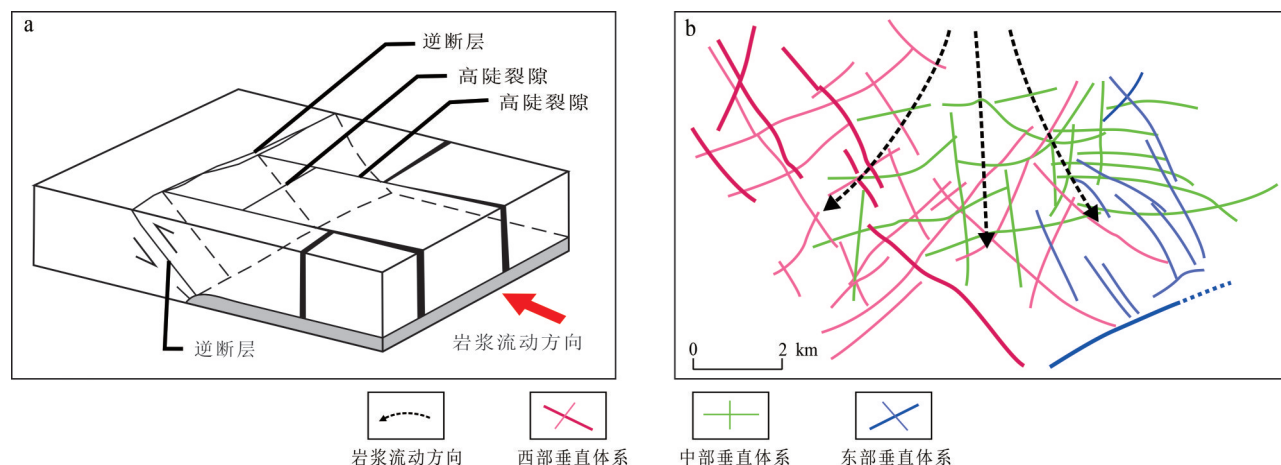


图13 火成岩相关构造揭示岩浆流动方向的原理

Fig. 13 Magma flow direction revealed by the distribution of igneous related structures

a. 火成岩相关构造形成原理(引自文献[22]); b. 顺北研究区应用实例

相关逆断裂普遍发育在二叠纪的喷出岩之下。喷出岩致密、物性差,通常可作为良好的盖层。火成岩相关逆断层可以提供大量的构造圈闭,包括断块圈闭、背斜圈闭以及断背斜圈闭。特别是当两个反倾岩脉相遇,两条逆断层夹起的块体隆起,包括隆起上方形成的强制褶皱,都是有利圈闭类型。此外,这些断裂形成于早、中二叠纪的岩浆活动时期,处于成烃的高峰期,与成藏期匹配,可成为重要的油气垂向运移通道。而当岩浆活动结束,断层不再活动,断层内部因强烈研磨充填了断层泥等地质体,孔隙度和渗透率极大地降低,可起到封堵作用^[37-41]。由此可见,与火成岩侵入体及相关构造有关的油藏可成为碎屑岩层系勘探的新目标类型。

综上,研究火成岩对储层的改造作用、相关逆断层对油气运聚的控制作用,有助于开拓顺北地区乃至塔里木盆地的油气勘探领域,推进立体效益的实现和高质量勘探。

5 结论

1) 顺北地区的岩浆自深部运移至上奥陶统底界面(T_4 界面)后开始发生侧向流动,形成纵向叠置分布的碟形侵入岩体以及逆断层和高陡裂隙两类棋盘状展布的构造体系。

2) 碟形岩床及相关构造的发育和展布揭示出顺北地区的岩浆垂向侵入模式自下而上由“岩浆通道、叠置岩床和高陡构造”3部分组成,其中在岩浆自深部侵入到中、下奥陶统顶界面之后自北向南呈放射状侧向流动。

3) 火成岩侵入体对储层的改造作用、相关逆断层

对油气的运聚作用,不仅能够改善下古生界奥陶系碳酸盐岩内走滑断控储集体的性能,且有助于在上古生界碎屑岩内形成新的岩性及构造圈闭类型,对于顺北地区乃至塔里木盆地的油气勘探开发具有重要意义。

参考文献

- [1] Holford S, Schofield N, Macdonald J, et al. Seismic analysis of igneous systems in sedimentary basins and their impacts on hydrocarbon prospectivity: examples from the southern Australian margin[J]. The APPEA Journal, 52(1):229-252.
- [2] Correia U M D C, Honório, Bruno C Z, et al. Geometric characterization of igneous intrusions: 3-D seismic insights from the Campos Basin, SE Brazil [J]. Marine & Petroleum Geology, 2019, 102(4):725-739.
- [3] Smallwood J R, Maresh J. The properties, morphology and distribution of igneous sills: modelling, borehole data and 3D seismic from the Faroe-Shetland area[J]. Geological Society London Special Publications, 2002, 197(1):271-306.
- [4] Schutter S R. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks [J]. Geological Society of London Special Publications, 2003, 214(1):7-33.
- [5] Senger K, Millett J M, Planke S, et al. Effects of igneous intrusions on the petroleum system: a review[J]. First Break, 2017, 35(6):47-56.
- [6] Spacapan J B, Palma J O, Galland O, et al. Thermal impact of igneous sill-complexes on organic-rich formations and implications for petroleum systems: A case study in the northern Neuquén Basin, Argentina[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 91(3):519-531.
- [7] 朱毅秀, 金之钧, 林畅松, 等. 塔里木盆地塔中地区早二叠世岩浆岩及油气成藏关系[J]. 石油实验地质, 2005, 27(1):50-54.

Zhu Yixiu, Jin Zhijun, Lin Changsong, et al. Relations Between the early Permian magmatic rocks and hydrocarbon accumulation

- in the central Tarim. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(1):50-54.
- [8] 肖重阳, 杨林, 林波, 等. 塔里木盆地顺北地区二叠纪火山活动期次与分布[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2):177-185.
Xiao Chongyang, Yang Lin, Lin Bo, et al. Volcanic activity stages and distribution during the Permian in the Shunbei area, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2):177-185.
- [9] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 塔里木盆地巴楚地区二叠纪以来构造应力场解析[J]. *地质力学学报*, 2011, 17(3):55-66.
Li Le, Hou Guiting, Pan Wenqing, et al. Study on structural stress fields since Permian, Bachu area, Tarim Basin. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17(3):55-66.
- [10] 余星, 杨树锋, 陈汉林, 等. 塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式[J]. *中国科学:地球科学*, 2017, 47(10):1179-1190.
Yu Xing, Yang Shufeng, Chen Hanlin, et al. Petrogenetic model of the Permian Tarim Large Igneous Province[J]. *Science China Earth Science*, 2017, 47(10):1179-1190.
- [11] Qiu H B, Deng S, Cao Z C, et al. The evolution of the complex anticlinal belt with crosscutting strike-slip faults in the central Tarim Basin, NW China[J]. *Tectonics*, 2019, 38(6):2087-2113.
- [12] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2):207-221.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2):207-221.
- [13] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1):142-147.
An Haiting, Li Haiyin, Wang Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1):142-147.
- [14] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5):990-999.
Deng Shang, Li Huili, Han Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5):990-999.
- [15] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5):878-888.
Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5):878-888.
- [16] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 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[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(6):1-16.
Deng Shang, Liu Yuqing, Liu Jun, et al. 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*, 2020, 44(6):1-16.
- [17] Deng S, Li H L, Zhang Z P, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1):109-137.
- [18] 温声明, 王建忠, 王贵重, 等. 塔里木盆地火成岩发育特征及对油气成藏的影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(B11):33-39.
Wen Shengming, Wang Jianzhong, Wang Guizhong, et al. Development characteristics of igneous rocks and their influence on hydrocarbon accumulation in Tarim Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2005, 40(B11):33-39.
- [19] 钟广法, 马在田, 刘瑞林, 等. 塔里木盆地奥陶系萤石脉—油气叠合成藏作用——高分辨率成像测井资料提供的证据[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(4):576-582.
Zhong Guangfa, Ma Zaitian, Liu Ruilin, et al. Origin of the oil and gas accumulation related to fluorite veins in Lower Ordovician Limestones, Tarim Basin, Northwest China: evidence from high resolution borehole electric image logs[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(4):576-582.
- [20] 马中远, 任丽丹, 黄苇, 等. 塔里木盆地塔中地区火成岩的基本特征[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(3):64-67.
Ma Zhongyuan, Ren Lidan, Huang Wei, et al. Basic characteristics of igneous rock in the middle area of Tarim Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2013, 20(3):64-67.
- [21] Magee C, Jackson A L, Schofield N. The influence of normal fault geometry on igneous sill emplacement and morphology[J]. *Geology*, 2013, 41(4):407-410.
- [22] Coetsee A, Kisters A. The 3D geometry of regional-scale dolerite saucer complexes and their feeders in the Secunda Complex, Karoo Basin[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2016, 317(1):66-79.
- [23] Hansen D M, Cartwright J. The three-dimensional geometry and growth of forced folds above saucer-shaped igneous sills[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(8):1520-1535.
- [24] Polteau S, Mazzini A, Galland O, et al. Saucer-shaped intrusions: Occurrences, emplacement and implications[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2008, 266(1-2):195-204.
- [25] Galland O, Planke S, Neumann E, et al. Experimental modeling of shallow magma emplacement: Application to saucer-shaped intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3-4):373-383.
- [26] Mathieu L, Vries B V W D, Holohan E P, et al. Dykes, cups, saucers and sills: Analogue experiments on magma intrusion into brittle rocks[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2008, 271(1-4):1-13.
- [27] Abdelmalak M M, Mourgues R, Galland O, et al. Fracture mode analysis and related surface deformation during dyke intrusion: Results from 2D experimental modelling[J]. *Earth & Planetary*

- Science Letters, 2012, 359–360: 93–105.
- [28] Grippa A, Hurst A, Palladino G, et al. Seismic imaging of complex geometry: Forward modeling of sandstone intrusions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 513: 51–63.
- [29] 王小东, 张铭杰, 伏珏蓉, 等. 稀有气体同位素对岩浆侵入方向的制约: 以夏日哈木镍铜硫化物矿床为例[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3433–3444.
- Wang Xiaodong, Zhang Mingjie, Fu Yurong, et al. The magmatic intrusive direction constrains from noble gas isotopic composition: A case study of the Xiarihamu Ni–Cu sulfide deposit in East Kunlun orogenic belt, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3433–3444.
- [30] 宋才见, 李谭伟, 李明陆, 等. 湖南东坡半隐伏岩体的侵入方向及其空间形态特征[J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(3): 317–324.
- Song Jiancai, Li Tanwei, Li Minglu, et al. Intrusion Direction and Spatial Morphological Characteristics of Dongpo Semi-concealed Rock Body in Hunan Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2019, 35(3): 317–324.
- [31] 杨宁, 吕修祥, 郑多明. 塔里木盆地火成岩对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(4): 1–4.
- Yang Ning, Lv Xiuxiang, Zheng Duoming. Alteration of the igneous rock on the carbonate reservoirs in Talimu Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(4): 1–4.
- [32] 徐方慧, 王祝文, 王文华, 等. 联合 EMD 和分数阶 Fourier 变换的裂缝性火成岩地层纵波和横波时频特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 60–71.
- Xu Fanghui, Wang Zhuwen, Wang Wenhua, et al. Time-frequency characteristics of P and S waves in fractured igneous formation based on joint EMD and fractional Fourier transform [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(6): 60–71.
- [33] 卢异, 夏国朝, 吕栋梁等. 缝洞型火成岩油藏注水提高采收率研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 96–101.
- Lu Yi, Xia Guochao, Lyu Dongliang, et al. Enhancing oil recovery by waterflooding in fracture-cave Igneous reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 96–101.
- [34] 林波, 云露, 李海英等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1344–1353.
- Lin Bo, Yun Lu, Li Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344–1353.
- [35] 文山师, 李海英, 洪才均, 等. 顺北油田断溶体储层地震响应特征及描述技术[J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 45–49.
- Wen Shanshi, Li Haiying, Hong Caijun, et al. Technology of seismic response characteristics and description of fault-karst reservoir in Shunbei Oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1): 45–49.
- [36] 王斌, 赵永强, 何生, 等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 965–974.
- Wang Bin, Zhao Yongqiang, He Shen, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 965–974.
- [37] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 975–984.
- Cao Zicheng, Lu Qinghua, Gu Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 975–984.
- [38] 韩强, 云露, 蒋华山, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系油气充注过程分析. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 645–658. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200141.
- Han Qiang, Yun Lu, Jiang Huashan, et al. Marine oil and gas filling and accumulation process in the north of Shuntuoguole area in northern Tarim Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 645–658. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200141.
- [39] 林波, 云露, 张旭, 等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法: 以塔里木盆地顺北5号断层中北段为例. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1006–1018. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200122.
- Lin Bo, Yun Lu, Zhang Xu, et al. A method for plane segmentation of small-scale intraplate strike-slip faults: A case of the middle-north segment of Shunbei No. 5 Fault in Tarim Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1006–1018. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200122.
- [40] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136–142. DOI:10.7657/XJPG20210202.
- Yun Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136–142. DOI:10.7657/XJPG20210202.
- [41] 韩俊, 况安鹏, 能源, 等. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 152–160. DOI:10.7657/XJPG20210204.
- Han Jun, Kuang Anpeng, Neng Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 152–160. DOI:10.7657/XJPG20210204.

(编辑 卢雪梅)