

塔里木盆地顺北西部地区火成岩侵入体发育特征及其与断裂耦合关系

牛月萌^{1,2}, 韩俊³, 余一欣^{1,2}, 黄诚³, 林波³, 杨帆^{1,2}, 余浪^{1,2}, 陈俊宇^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011]

摘要:塔里木盆地顺北西部地区火成岩侵入体分布广泛,对地层和含油气系统改造作用明显,但该地区火成岩侵入体发育特征及其与深部走滑断裂带之间的耦合关系并不十分清楚。基于顺北西部地区最新二维和三维地震资料,精细刻画了火成岩侵入体形态特征,划分了火成岩侵入体不同类型及组合关系,判定了火成岩侵入体发育期次,确定了火成岩侵入体与深部走滑断裂耦合关系。结果表明:①顺北西部地区火成岩侵入体具有“一”字形、舌形、碟形以及半碟形几种形态类型。②单一侵入岩床通过相接、相连及错断组合形成岩床复合体。③火成岩侵入体主要分布于中-下奥陶统顶面至中-下泥盆统顶面之间,侵入岩床活动类型包括单期单层、单期多层和多期多层3类。④不整合面和断裂作为岩浆侵入的通道,控制了火成岩侵入体发育数量和规模,导致研究区南部和北部侵入作用存在明显差异。⑤研究区北部深部走滑断裂作为岩浆主要侵入通道,纵向侵入作用较强;南部岩浆以不整合面为主要侵入通道,横向侵入作用更强。

关键词:断裂;不整合面;断裂耦合;火成岩侵入体;走滑断裂带;顺北西部地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Igneous rock intrusions in the western Shunbei area, Tarim Basin: Characteristics and coupling relationships with faults

NIU Yuemeng^{1,2}, HAN Jun³, YU Yixin^{1,2}, Huang Cheng³, Lin Bo³, YANG Fan^{1,2}, YU Lang^{1,2}, CHEN Junyu^{1,2}

[1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China]

Abstract: Igneous rock intrusions are extensively distributed in the western Shunbei area, Tarim Basin, playing a significant role in transforming stratigraphic architecture and petroliferous systems. However, there is a lack of clear understanding of their characteristics and coupling relationships with deep strike-slip fault zones. Using the latest 2D and 3D seismic data of the area, we present a fine-scale characterization of their morphological features, categorizing their types and combinations. Furthermore, we identify their developmental stages and define their coupling relationships with deep strike-slip faults. The results show that the igneous rock intrusions in the western Shunbei area exhibit multiple morphotypes, including stratum-concordant, tongue-, saucer-, and half-saucer-shaped intrusions. Individual intrusive sheets can combine to form sill complexes through processes of conjunction, connection, and fault-induced dislocation. The igneous intrusions in the Shunbei area predominantly occur between the tops of the Middle-Lower Ordovician and the Middle-Lower Devonian, with the activity types of intrusive sheets being categorized into single-stage and single-layer, single-stage and multi-layer, and multi-stage and multiple-layer types. Unconformities and faults, acting as magma conduits, dictate the quantity and scale of the igneous rock intrusions, leading to notable disparities in igneous rock intrusions between the southern and northern parts of the study area. Specifically, the

收稿日期:2023-08-02;修回日期:2023-12-16。

第一作者简介:牛月萌(1998—),女,硕士研究生,含油气盆地分析。E-mail: 2425538777@qq.com。

通信作者简介:余一欣(1977—),男,博士、副教授,含油气盆地构造地质学。E-mail: yuxin0707@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42372145)。

northern part of the study area featuring the deep strike-slip faults serving as primary magma conduits, exhibits intense vertical magma intrusion. In contrast, the southern part featuring unconformities acting as magma conduits, shows stronger horizontal magma intrusion.

Key words: fault, unconformity, coupling with faults, igneous rock intrusion, strike-slip fault zone, western Shunbei area, Tarim Basin

引用格式:牛月萌,韩俊,余一欣,等.塔里木盆地顺北西部地区火成岩侵入体发育特征及其与断裂耦合关系[J].石油与天然气地质,2024,45(1):231-242. DOI:10.11743/ogg20240116.

NIU Yuemeng, HAN Jun, YU Yixin, et al. Igneous rock intrusions in the western Shunbei area, Tarim Basin: Characteristics and coupling relationships with faults[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 231-242. DOI: 10.11743/ogg20240116.

火成岩侵入体广泛分布于中国塔里木盆地^[1-2]、珠江口盆地^[3-4]、台西南盆地^[5]、东海陆架盆地^[6]和宁芜盆地^[7]等地区。岩浆侵入过程对含油气盆地地层结构和含油气系统具有重要的改造作用。岩浆通过断裂、裂缝以及不整合面侵入于同一套地层或多套地层中,导致形态各异侵入体与原状地层交互出现,使含油气盆地地层结构复杂化。岩浆侵入过程中伴随大量热量产生,加速含油气盆地烃源岩热演化,同时其能够诱发上覆地层发生褶皱变形,形成低幅度圈闭,为浅层油气的运聚提供良好的储集空间^[8]。火成岩侵入体在 seismic 剖面上表现为强振幅反射特征,与围岩之间存在较强的波阻抗,侵入岩床两侧尖端强振幅反射特征明显减弱^[2-3,9]。根据侵入岩床在 seismic 剖面上的反射特征,能够有效识别火成岩侵入体。望畅等(2022)^[3]根据侵入岩床的形态特征和地震反射特征,识别并刻画出板状、碟状、舌状及透镜状复合体4种类型侵入岩床。基于三维地震数据体刻画,Hansen等(2004)^[10]识别出岩床复合体不同连接部位的几何形态,将侵入岩床交切组合样式划分为相接、相连及错断3种类型。

塔里木盆地是由多期构造运动叠合而成,盆地内发育多走向、多类型及多期次走滑断裂系统,经历了震旦纪—寒武纪、晚奥陶世—志留纪、二叠纪及白垩纪等岩浆活动^[11-13]。贾承造等(2021)^[14]提出塔里木盆地走滑断裂具有多期活动、平面分区、纵向分层的特点,其形成演化与基底结构和周缘洋盆在不同时期运动产生的应力场有关。基于构造类型与岩浆活动之间的匹配关系分析,姚泽伟(2017)^[15]揭示不整合面和走滑断裂作为岩浆运移通道,控制了塔中及其邻区岩浆侵入过程和分布。岩浆侵入引起上覆地层的变形,形成强制褶皱、边缘断裂及高陡裂隙等构造样式^[2-3,8]。前人针对塔里木盆地塔中及其邻区和顺北地区火成岩侵入体及相关构造发育特征进行了研究,建立了岩浆垂向侵

入模式,明确了岩浆流动方向^[2,16]。顺北西部地区火成岩侵入体形态各异,前人主要描述顺北地区碟形岩床发育特征,并指出岩浆在拉张环境下,能够沿走滑断裂发生垂向侵入^[2],但尚未对不同形态的侵入体进行系统刻画,侵入体平面分布规律不清,而且不同类型火成岩侵入体与深部走滑断裂带之间的耦合关系还有待进行深入研究。本文主要基于顺北西部地区最新二维、三维地震资料,系统刻画火成岩侵入体多种三维形态特征,同时结合区域岩浆活动背景、火成岩侵入体相关构造发育特征及深部走滑断裂带发育特征,明确火成岩侵入发育期次,探讨深部走滑断裂带与火成岩侵入体之间的耦合关系,深化认识顺北西部地区岩浆活动时间和侵入过程,为火成岩侵入体发育区块油气勘探部署提供科学指导。

1 区域地质背景

塔里木盆地是中国最大的多期叠合内陆盆地^[17-21],经历了多期岩浆活动,形成震旦纪—寒武纪、晚奥陶世—志留纪、二叠纪以及白垩纪4期火成岩,其中二叠纪岩浆活动规模最大,火成岩分布范围最广^[11,22]。①震旦纪—寒武纪,塔里木盆地东部陆内裂谷发育,西北部裂谷发育不完全,此时盆地内火成岩主要为板内玄武岩^[11]。②晚奥陶世—志留纪,岛弧火山活动作用于盆地北部,导致拗拉槽封闭^[11]。③二叠纪,受南部古特提斯洋板块与北部中天山弧共同俯冲作用影响,盆地整体隆升,形成横向裂谷,产生了中—酸性火成岩^[11,22]。④白垩纪岩浆活动较弱,火成岩局限分布于盆地边缘。塔里木盆地多期岩浆活动导致研究区火成岩侵入体广泛发育。

本文研究区主体位于塔里木盆地顺托果勒低隆起西部,还包括沙雅隆起西南部、卡塔克隆起西北部及阿瓦提拗陷部分区域(图1)。顺托果勒低隆起是塔里木

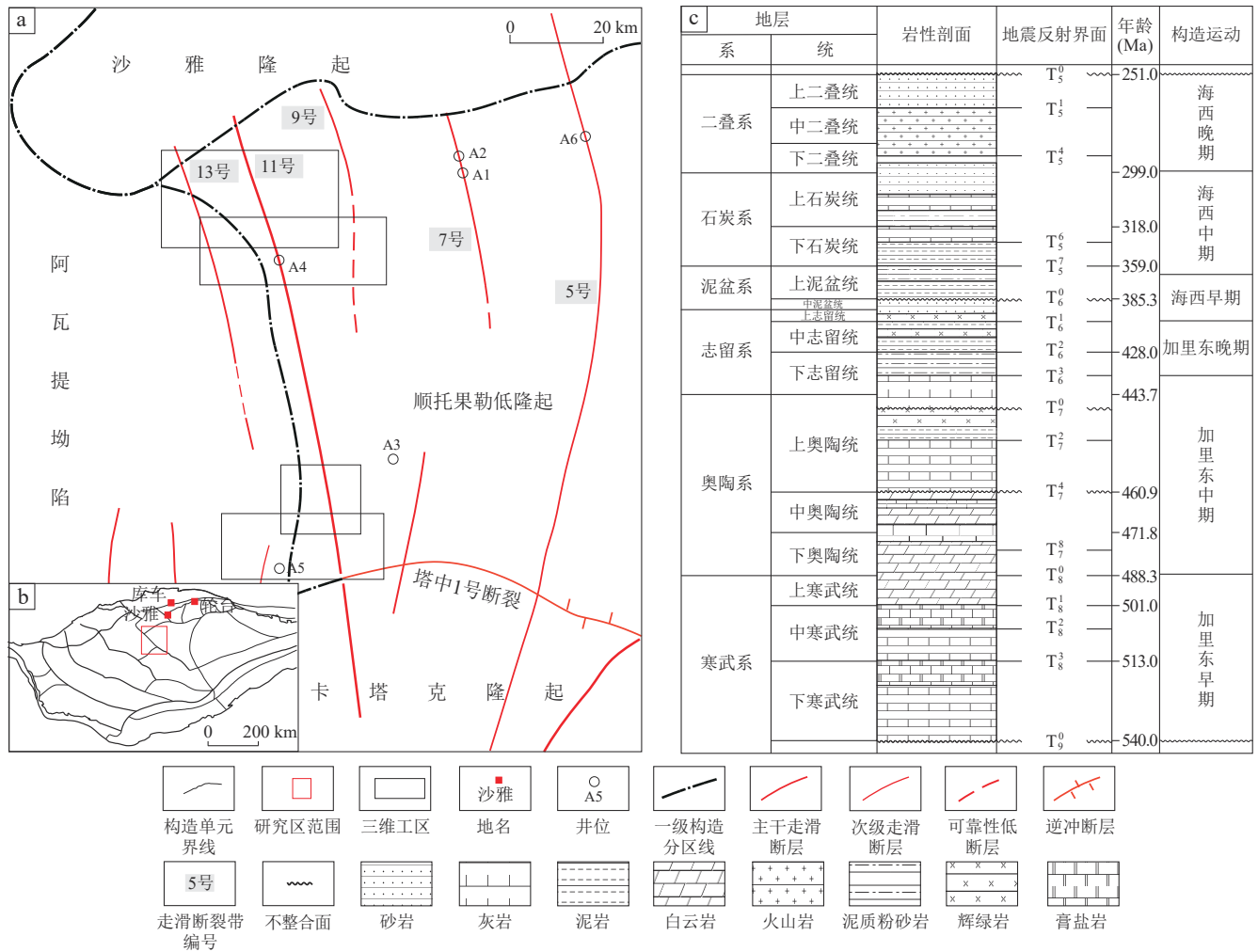


图1 顺北西部地区区域地质及地层综合柱状图

Fig. 1 Regional geological map and composite stratigraphic column of the western Shunbei area

a. 顺北西部主干断裂分布; b. 塔里木盆地构造单元; c. 顺北西部地层综合柱状图

盆地内相对稳定的一级构造单元,东邻满加尔坳陷,西接阿瓦提坳陷,南北向地处塔北隆起和卡塔克隆起之间。该区自古生代以来经历了4次构造演化阶段:①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;②加里东中、晚期—海西早期(晚奥陶世—中泥盆世)克拉通形成演化与盆地整体挤压阶段,该时期断裂活动性较强,主要以走滑断裂为主;③海西、中晚期—印支期(石炭纪—侏罗纪)盆地持续抬升阶段,同时走滑断裂体系继承性活动;④燕山期—喜马拉雅期埋深定型阶段^[13, 23-25]。研究区古生代地层发育相对齐全,自下而上发育寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系以及二叠系^[26-27],缺失下泥盆统和中石炭统(图1c),上奥陶统和志留系中钻遇辉绿岩(表1),其形成与塔里木盆地二叠纪大规模岩浆活动和侵入事件密切相关。

2 火成岩侵入体特征

2.1 侵入体形态特征

火成岩侵入体与周缘围岩地层存在强波阻抗差异,在地震剖面中表现为强振幅、连续性好及两侧尖端突然中止的反射特征。高分辨率三维地震剖面解释结果表明,顺北西部火成岩侵入体主要分布于上奥陶统和志留系内,侵入岩床形态主要包括一字形、舌形、碟形和半碟形等4种类型(表2)。

1) 一字型岩床

岩浆沿不整合面顺层侵入,形成厚度均一的一字形侵入体,与上覆、下伏地层之间呈整合接触,侵入层位较少,规模小,刺穿上覆地层特征不明显。一字形岩

表1 顺北西部地区钻遇侵入岩岩石类型统计

Table 1 Statistics of intrusive rock types encountered during drilling in the western Shunbei area

井号	侵入岩岩性	钻遇深度/m	钻遇层系	岩石类型划分
A1	辉绿岩	6 630 ~ 6 635	志留系、 上奥陶统	基性侵入岩
		7 415 ~ 7 520		
A2	辉绿岩	6 899 ~ 6 908	上奥陶统	基性侵入岩
		7 065 ~ 7 067		
		7 371 ~ 7 373		
A3	辉绿岩	6 612 ~ 6 736	上奥陶统	基性侵入岩
A4	辉绿岩	6 244 ~ 6 271	志留系、上 奥陶统	基性侵入岩
		6 503 ~ 6 606		
		7 434 ~ 7 471		
		7 582 ~ 7 583		
		7 601 ~ 7 630		
		7 736 ~ 7 739		
		8 118 ~ 8 121		
		7 309 ~ 7 348		
A5	辉绿岩	8 125 ~ 8 135	上奥陶统	基性侵入岩
		8 151 ~ 8 155		
		6 739 ~ 6 818		
		6 889 ~ 6 899		
		7 199 ~ 7 203		
A6	辉绿岩	7 206 ~ 7 210	上奥陶统	基性侵入岩
		7 421 ~ 7 455		
		7 521 ~ 7 527		

床三维形态宽而薄,未发现岩浆四散扩溢。

2) 舌形岩床

舌形岩床底部较厚,是岩浆向上单边高角度斜切地层形成的舌状侵入体。此类侵入岩床切割同相轴数量较多,但展布范围较小。三维空间视角揭示舌状岩床底部呈收敛趋势并以高角度向上侵入。

3) 碟形岩床

岩浆沿不整合面横向侵入结束后,岩床两端继续呈一定角度上侵形成底部厚度较大、两侧厚度逐渐减薄的碟形岩床。完整的碟形岩床包括平坦的内部岩床、斜切地层的倾斜岩脉及由倾斜岩脉向外顺层延伸形成的外部岩床。表2中的③号岩床是研究区内发育较为完整的碟形岩床,两侧边缘形态较为对称。研究区内大部分碟形岩床不发育外部岩床,推测其是否发育受岩浆注入规模和岩浆侵入机制所制约。

4) 半碟形岩床

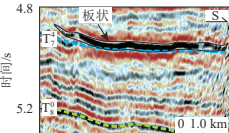
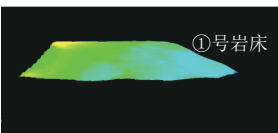
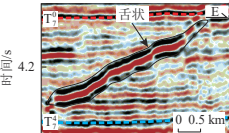
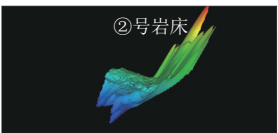
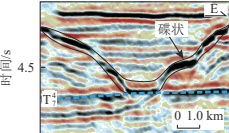
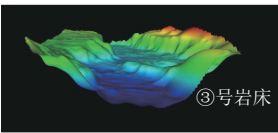
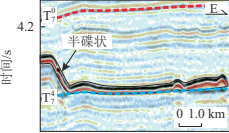
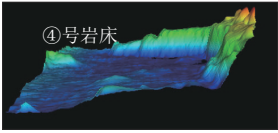
半碟形岩床是岩浆沿不整合面横向流动,横向延伸终止后在单边高角度斜切地层中形成的近似半碟状的侵入岩床。半碟形岩床通常由断裂或裂隙直接供给岩浆,上覆地层可见轻微褶曲,与舌形岩床相比,三维视角中半碟形岩床内岩床宽而平缓,两者形态差异可能受岩浆自身性质和围岩内聚力的影响^[3]。

2.2 侵入体交切关系

单一形态的侵入岩床以不同方式交切组合,形成规模更大的岩床复合体。根据侵入岩体与围岩的地震反射特征差异,可以识别岩床复合体。研究区发现的岩床复合体内部岩床间交切组合方式有3种,分别为

表2 顺北西部地区火成岩侵入体形态及地震识别特征

Table 2 Morphologies and seismic characteristics of igneous rock intrusions in the western Shunbei area

形态类型	示意图	二维剖面	三维形态特征	地震识别特征
一字形				一字形岩床,岩浆沿地层面顺层侵入,厚度均一,呈长条状与地层平行展布,具有强振幅反射特征
舌形				舌状岩床,岩浆沿地层面斜向侵入,岩床底部较厚,向上逐渐减薄,呈舌状斜切地层,具有强振幅反射特征,倾斜段连续性较差
碟形				碟状岩床,岩浆沿地层面顺层侵入后两端继续斜向上侵,岩床底部最厚,两侧逐渐减薄,具有强振幅反射特征
半碟形				半碟状岩床,发育不完全的碟状岩床,岩床底部最厚,侧向减薄,具有强振幅反射特征,上覆地层可见轻微挠曲

相连、相接及错断(图2)。

1) 岩床相连

岩床相连是指两个侵入岩床在倾斜岩脉尖端处相遇并连接,岩浆运移过程中以任意角度终止于另一岩床翼部的交切组合方式被称为岩床相接(图2a₁,a₂)。

2) 岩床相接

相接的两个侵入岩床是深部岩浆向浅部地层运移过程中相遇而形成的一种岩床复合体形态(图2b₁,b₂)。

3) 岩床错断

根据岩床之间的截切关系可以判断岩床形成的先后顺序,早期活动的侵入岩床限制晚期活动岩床的侧向侵入,晚期岩床截断早期形成的岩床,这种模式被称为岩床错断(图2c₁,c₂)。岩床错断叠接部位,上覆地层隆起形成边缘断裂,早期岩床错断部位被抬升,尖端向后轻微旋转。

3 火成岩侵入体活动类型

前人判别火成岩侵入体发育期次方法可归纳为3类:①利用母体同位素与子体同位素的比例关系判断同位素年龄,进而明确侵入体的形成时间^[28];②识别火成岩侵入体相关强制褶皱两翼地层角度不整合面

确定岩浆侵入体活动期次^[29];③岩浆侵入造成上覆地层隆起,形成火成岩侵入体相关边界断裂,根据边界断裂的形成时期判断火成岩侵入体的发育期次^[2]。顺北西部地区二维和三维地震资料丰富,可以结合区域岩浆活动事件和侵入岩体活动期次判定方法,探究火成岩侵入体形成期次。

从区域岩浆活动事件来看,二叠纪塔里木板块与西伯利亚板块发生俯冲碰撞。该时期塔里木板块处于弧后伸展环境^[2,11],大规模岩浆由深层向浅层运移,火成岩侵入体的形成与该时期岩浆事件密切相关。顺北西部地区钻遇火成岩侵入体统计结果表明,侵入体分布于上奥陶统-志留系中,岩性主要为辉绿岩,属于塔里木盆地二叠纪大火成岩省早期基性岩浆一部分,说明顺北西部地区以基性岩浆作用为主。根据侵入岩床与周缘地层的接触关系,将侵入岩床活动类型划分为单期单层、单期多层及多期多层等3种(图3)。

3.1 单期单层

地震剖面特征显示(图3a₁),1号侵入岩床以平缓的一字形分布于上奥陶统中,岩浆没有向四周斜向侵入运移,说明岩浆侵入时期晚于晚奥陶世;一字形岩床

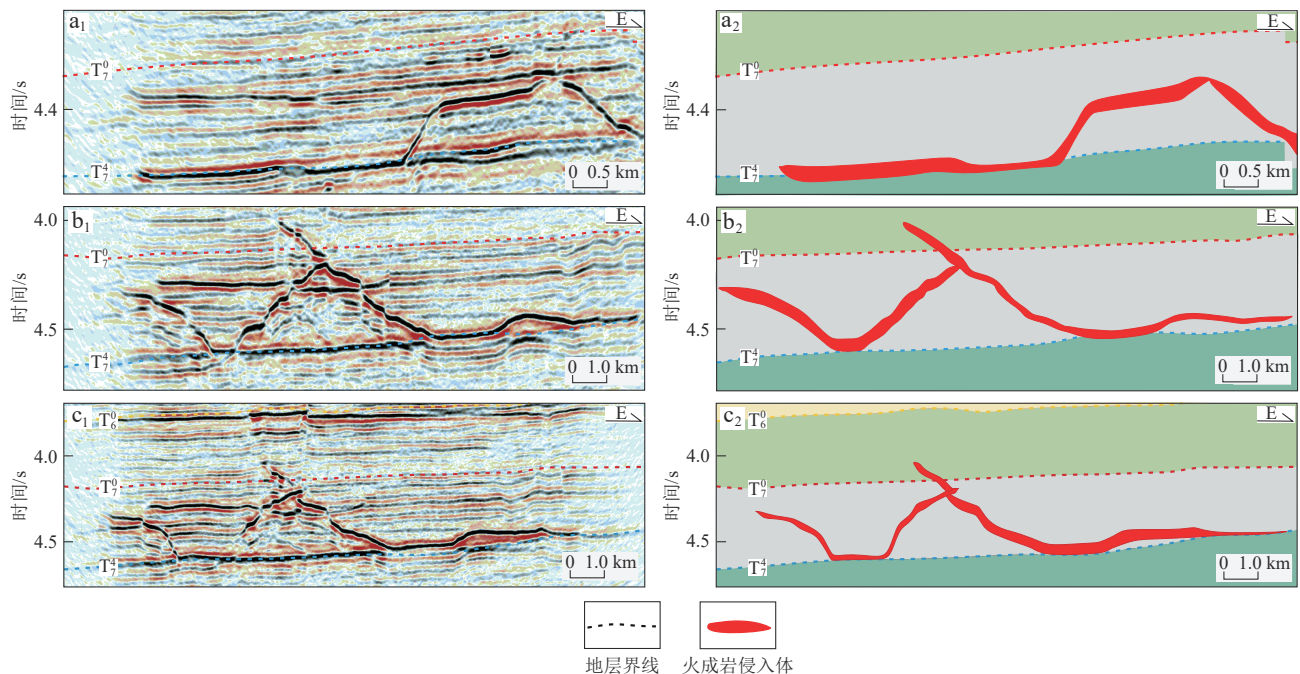


图2 顺北西部地区岩床复合体内部岩床间的交切关系

Fig. 2 Cross-cutting relationships within sill complexes in the western Shunbei area

a₁. 岩床相连模式解释前剖面; a₂. 岩床相连模式解释后剖面; b₁. 岩床相接模式解释前剖面; b₂. 岩床相接模式解释后剖面; c₁. 岩床错断模式解释前剖面; c₂. 岩床错断模式解释后剖面

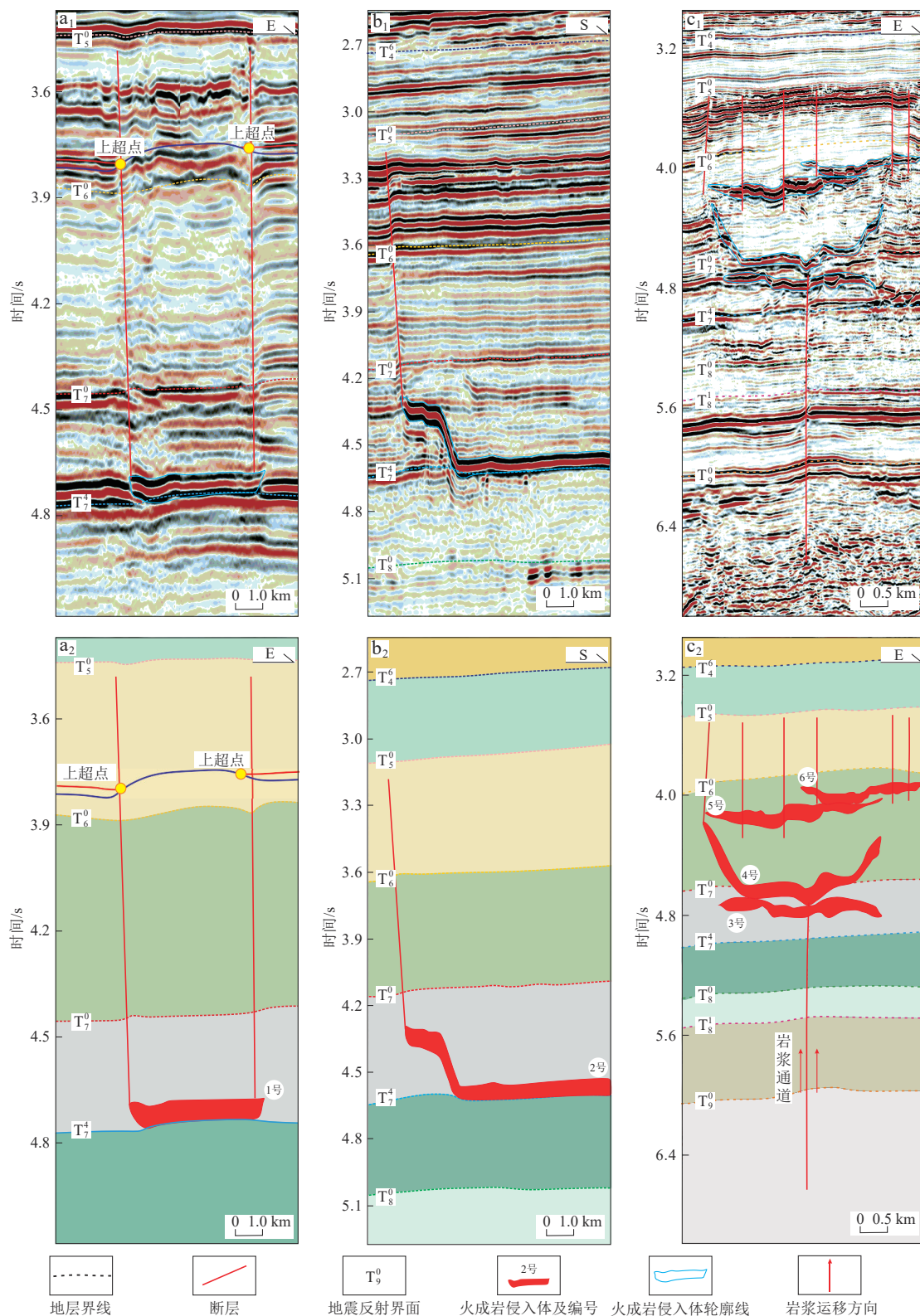


图3 顺北西部地区侵入岩床的活动类型分类

Fig. 3 Activity types of intrusive sheets in the western Shunbei area

a₁. 单期单层类型解释前剖面; a₂. 单期单层类型解释后剖面; b₁. 单期多层类型解释前剖面; b₂. 单期多层类型解释后剖面;
c₁. 多期多层类型解释前剖面; c₂. 多期多层类型解释后剖面

可见上覆地层发生轻微褶皱变形和尖端部位形成的边缘断裂(图 3a₁, a₂), 褶皱两翼于二叠系中存在上超不

整合接触, 断裂错断二叠系中-下部至火成岩侵入体边缘部位, 说明该褶皱和断裂形成于中-晚二叠世。

根据火成岩侵入体上覆褶皱和边缘断裂的形成时期,推测1号侵入岩床形成于中-晚二叠世,与此时的岩浆活动背景一致。

3.2 单期多层

岩浆沿断裂或裂隙向浅部地层运移,沿不整合面顺层侵入,同时斜向上流动形成交切多个同向轴的2号侵入岩床(图3b₁,b₂)。地震剖面显示,该侵入岩床发育于上奥陶统中,说明侵入岩床形成时间晚于晚奥陶世。剖面可见由岩浆侵入作用形成的边界断裂,边界断裂断穿二叠系中-下部至2号火成岩侵入体边缘部位,结合边界断裂两侧地层褶皱变形特征,判断边界断裂形成于中-晚二叠世。边界断裂与2号侵入岩床存在成因联系,属于同期形成侵入岩床及其相关构造,推测2号侵入岩床形成时期为中-晚二叠世。

3.3 多期多层

地震剖面显示3号和4号岩床由同一岩浆通道供给岩浆,4号岩床底部存在一定范围向下凸起的尖点与3号岩床相接触(图3c₁,c₂),说明岩浆沿通道运移过程中侵入不同层位,形成在空间上相接的3号和4号岩床(图3c₂)。由于3号和4号岩床存在贴合部位且两个岩床延伸方向一致,推测两者形成于同一时期。5号和6号岩床发育于4号岩床正上方,并通过边界断裂与4号岩床相连,说明3号和4号岩床形成后,后期岩浆沿边界断裂或裂隙运移,并在上方侵入形成5号和6号岩床(图3c₂)。5号岩床东部与6号岩床底部相互接触,两者形态相似,表明两者具有同一岩浆源且发育期次相同。

侵入岩床上方断裂终止于二叠系上部,对下伏地层控制作用不明显,说明断裂形成于晚二叠世。5号和6号岩床被上方断裂错断,推测为后期断裂活动截断先存的侵入岩床,因此判定5号和6号岩床发育时间早于晚二叠世。由于岩浆是由深部向浅层运移,判定3号和4号岩床形成时间早于5号和6号岩床,其边界断裂发育可解释为先期岩浆上涌,造成沉积地层隆起形成断裂,后期该断裂发生继承性活动至晚二叠世终止。玉东2井在井深5 089~5 091 m处钻遇一套辉绿岩侵入体,经Ar-Ar同位素定年,测得年龄为248.84 Ma±4.75 Ma^[30],与顺2井在上奥陶统钻遇的辉绿岩年龄基本一致^[31],两组同位素测年的结果表明,该区侵入岩床形成时间为中-晚二叠世。顺北西部地区辉绿岩侵入体发育于中-晚二叠世,与塔里木盆地二叠纪岩浆

活动背景相符合,其区域岩浆活动时期与边缘断裂限定的侵入岩床形成时间基本一致。

4 断裂与火成岩侵入体的耦合关系

4.1 火成岩侵入体分布特征

火成岩侵入体在剖面上表现出明显的纵向叠置现象(图4)。剖面显示岩浆沿T₇不整合面开始侵入,形成2套典型侵入岩床,分别分布在T₇-T₇^o界面(碳酸盐岩层)和T₇^o-T₆^o界面(碎屑岩层)。T₇^o界面和T₇界面作为全区发育的不整合界面,有利于岩浆运移,同时,两个不整合面也是走滑断裂分层发育的重要界面,深度走滑断裂长期持续性活动为岩浆运移提供了通道。顺北西部地区侵入岩床的发育规模和数量与深部走滑断裂带活动类型和强度存在密切联系。

11号走滑断裂带不同分段侵入岩床发育规模统计结果揭示,不同叠置类型走滑断裂带侵入岩床发育规模存在明显差异(表3)。压扭-压扭型断裂两侧地层错断距较小,断裂活动性较弱,岩浆沿断面运移阻力较大,侵入岩床发育规模较小。平移型走滑断裂两侧地层相对连续且平缓,断裂活动强度弱,不利于岩浆的向上运移。张扭-张扭型断裂两侧地层有明显“下掉”现象,断裂的开启性好,为岩浆上涌提供优势运移通道,易形成大规模侵入岩床。总体上,张扭-张扭型断裂相较于其他2种不同活动类型断裂,其侵入岩床发育规模更大且数量更多(表3),发育侵入岩床平面投影面积最大为159.22 km²,而压扭-压扭型断裂和平移型走滑断裂侵入岩床平面投影面积仅分别为25.75 km²和17.07 km²,说明走滑断裂活动类型和强度影响岩浆的侵入作用。

4.2 火成岩侵入体与断裂耦合关系

研究区位于顺北5号走滑断裂带西部,研究区内主要发育顺北9号、11号及13号走滑断裂带(图1a)。研究区走滑断裂带在平面上表现出明显分段变形特征。例如,顺北11号走滑断裂带整体呈NNW走向(图5a),但断裂带局部区域走向发生偏转,自北向南由NNW向逐渐转变为近SN向。根据顺北西部地区11号走滑断裂带走向变化特征,将其划分为北部、中部及南部。

本文利用三维地震数据体,分别测量顺北11号断裂带T₇^o和T₇界面在不同分段内变形区和未变形区之

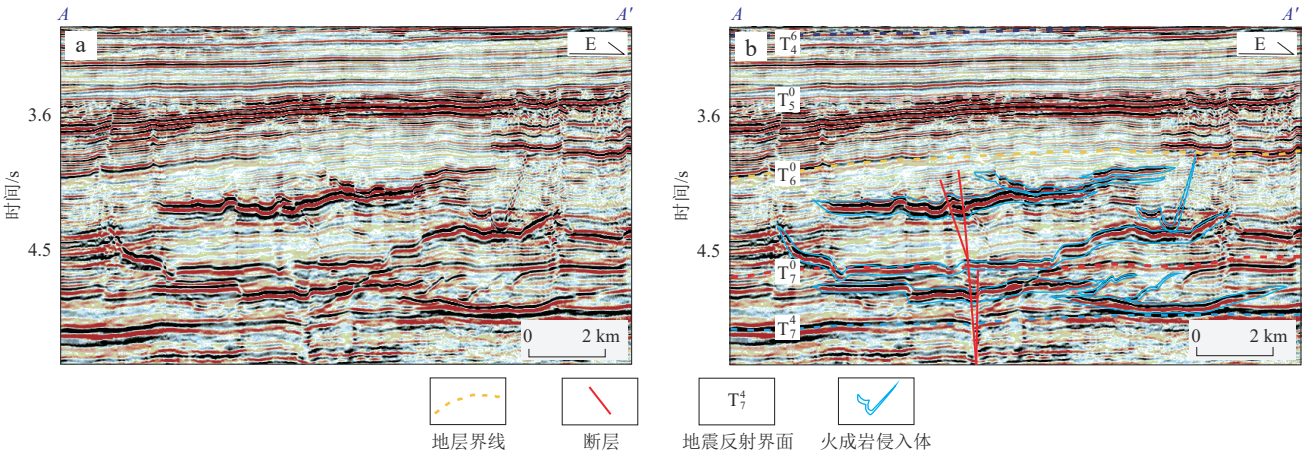


图4 顺北西部11号走滑断裂带周缘火成岩侵入体纵向分布(剖面位置见图5a)

Fig. 4 Seismic profiles showing the vertical distribution of igneous rock intrusions around the No. 11 strike-slip fault zone in the western Shunbei area (see Fig. 5 for the profile location)
a. 解释前剖面;b. 解释后剖面

表3 顺北西部地区不同断裂叠置类型下火成岩侵入体特征

Table 3 Characteristics of igneous rock intrusions under different superimposition types of faults in the western Shunbei area

断裂叠置类型	压扭-压扭型	平移-平移型	张扭-张扭型
解释前剖面			
解释后剖面			
岩床面积/km ²	25.75	17.07	159.22

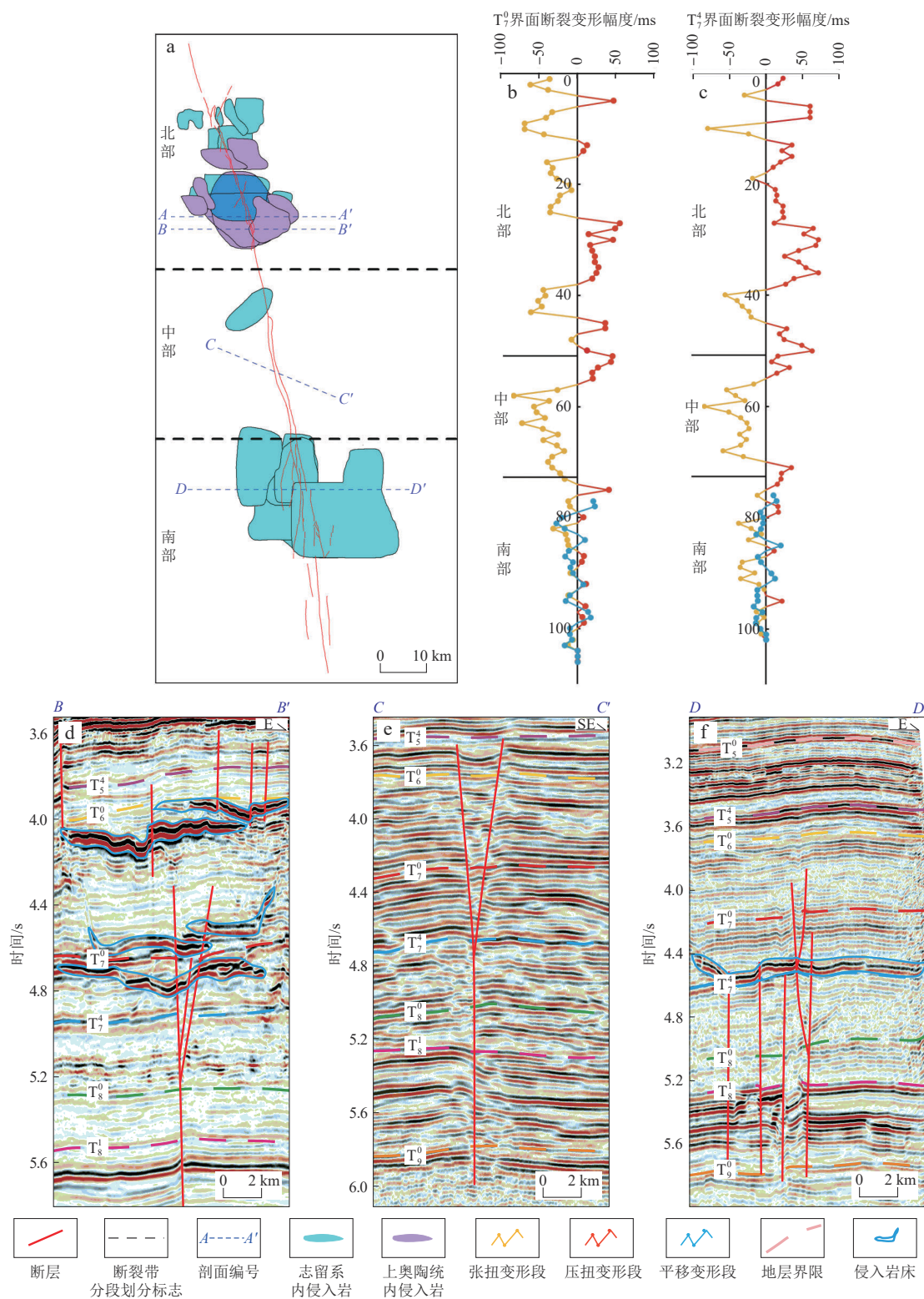


图5 顺北西部侵入体平面投影与顺北 11 号走滑断裂带耦合关系

Fig. 5 Planar distribution of igneous rock intrusions in the western Shunbei area and their coupling relationships with the No. 11 strike-slip fault zone

a. 顺北西部火成岩侵入体平面分布; b. 顺北 11 号走滑断裂带 T_9^0 界面断裂活动; c. 顺北 11 号走滑断裂带 T_7^1 界面断裂活动; d. 顺北 11 号走滑断裂带北部断裂剖面; e. 顺北 11 号走滑断裂带中部断裂剖面; f. 顺北 11 号走滑断裂带南部断裂剖面

间的相对幅度差值来反映断裂活动强度^[32]。如果统计点为正值,则表明处于压扭应力背景,地层发生上

拱变形;反之,则表明地层在张扭应力背景下发生“下掉”变形。 T_7^1 和 T_9^0 界面断裂带变形幅度统计结果表

明,顺北11号断裂带北部具有明显的分段性,压扭段和张扭段交互出现,断裂活动性较强(图5b,c)。地震剖面显示,11号走滑断裂带北部主干断裂深部断面直立, T_7^0 和 T_7^1 界面断裂变形幅度较大,分支断裂发育,断裂开启性好,岩浆易沿断裂发生运移形成数量较多的侵入岩床,同时断裂带的持续活动也有利于岩浆的纵向侵入,从而形成多期叠置的侵入岩床(图5d)。11号走滑断裂带中部不同界面断裂带变形幅度统计结果主要为负值,表现出张扭特征,而且统计结果绝对值较大,说明断裂活动性较强(图5b,c),但地震剖面(图5e)显示该区域侵入岩床发育数量较少,可能与中部岩浆房的发育规模有关。走滑断裂带南部地层变形幅度较小(图5b,c),断裂带以平移变形为主(图5f),局部出现弱挤压和弱拉张变形,断裂带活动较弱,岩浆主要沿不整合面发生横向侵入(图5f),形成面积较大的侵入岩床。

从火成岩侵入体与走滑断裂带的平面分布特征看(图5a),侵入体在顺北11号走滑断裂带北部发育数量较多,但岩床面积较小,侵入岩床相互叠置特征明显(图5d);中部侵入岩床发育数量较少,南部发育展布范围较大的侵入岩床(图5f),岩床相互叠置现象较北部弱。结合上述断裂带活动强度与侵入岩床分布之间匹配关系,说明顺北西部地区火成岩侵入体的形成受深部走滑断裂带活动强度所控制。

4.3 油气地质意义

二叠纪,顺北西部地区发生大规模岩浆侵入活动,导致研究区古地温升高,促进了烃源岩的成熟排烃。A1和A2井位于研究区7号走滑断裂带,钻遇2~3层不同深度辉绿岩侵入体(表1),两口井均发现不同程度油气显示,而7号走滑断裂带平面延伸距离较短,不利于深部坳陷烃源岩远距离供烃,岩浆侵入活动导致走滑断裂带周缘烃源岩进入高成熟阶段,该时期油气沿断裂带短距离运聚成藏。顺北11号走滑断裂带平面距离延伸较远,邻近阿瓦提坳陷,成藏条件优越,而位于断裂带北部A4已钻井油气显示较差,钻遇多层不同深度辉绿岩侵入体(表1)。侵入岩体平面分布显示研究区北部侵入岩体相互叠置现象明显(图5a),岩浆纵向侵入作用强,可能对早期油气成藏起到破坏作用。岩浆沿不整合面、断裂及裂缝侵入过程中能够一定程度溶蚀碳酸盐岩储层,导致侵入岩体周缘碳酸盐岩孔隙度发生变化,改造碳酸盐岩储层储集性。由于顺北西部地区岩浆侵入时期为二叠纪,时间较晚,可充填早期形成的碳酸盐岩缝洞型储集空

间,对早期碳酸盐岩储层储集空间表现为破坏作用。岩浆侵入过程中会诱发上覆地层发生褶皱变形,形成低幅度构造圈闭,为研究区浅层油气运聚成藏提供储集空间。

5 结论

1) 顺北西部地区火成岩侵入体广泛发育,其形态包括一字形、舌形、碟形和半碟形等侵入岩床。岩床复合体由两个或以上的单一侵入岩床通过相接、相连或错断组合形成。

2) 火成岩侵入体主要分布于中-下奥陶统顶面至中-下泥盆统顶面之间(T_7^1 — T_6^0 界面),发育期次为中-晚二叠世。根据侵入岩床与地层之间的切割关系,可将侵入岩床活动类型划分为单期单层、单期多层及多期多层3类。

3) 深部走滑断裂的活动类型影响火成岩侵入体的发育数量和规模,张扭-张扭型断裂相较于压扭-压扭型断裂和平移型断裂,更易形成数量较多、规模较大的侵入岩床。深部走滑断裂带活动强度和岩浆供给强弱控制了顺北西部地区火成岩侵入岩床的分布。

4) 岩浆沿不同通道的侵入作用存在差异,研究区北部岩浆沿断裂运移相对于沿不整合面侵入更易形成多期叠置的侵入岩床,南部岩浆以不整合面为主要运移通道,横向侵入作用较强,发育横向展布范围较大的侵入岩床。

参 考 文 献

- [1] 闫磊,李明,潘文庆.塔里木盆地二叠纪火成岩分布特征——基于高精度航磁资料[J].地球物理学进展,2014,29(4):1843-1848.
YAN Lei, LI Ming, PAN Wenqing. Distribution characteristics of Permian igneous rock in Tarim Basin——Based on the high-precision aeromagnetic data[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1843-1848.
- [2] 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.
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.
- [3] 望畅,孙启良,解习农,等.白云凹陷浅成岩浆侵入体发育特征、成因及油气地质意义[J].地球科学,2022,47(2):

- 505–517.
- WANG Chang, SUN Qiliang, XIE Xinong, et al. Characteristics and mechanisms of shallow igneous intrusions and their implications on hydrocarbon geology in the Baiyun Sag[J]. *Earth Science*, 2022, 47(2): 505–517.
- [4] DENG Peng, MEI Lianfu, LIU Jun, et al. Episodic normal faulting and magmatism during the syn-spreading stage of the Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin: Response to the multi-phase seafloor spreading of the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40(1): 33–50.
- [5] 魏玉鹏, 傅德龙, 刘洋廷, 等. 多道地震成像方法在台西南盆地断层与岩浆侵入体识别中的应用研究[J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(2): 257–272.
- WEI Yupeng, FU Delong, LIU Yangting, et al. Application of multichannel seismic imaging methods in the identification of faults and magmatic intrusions in southwest Taiwan Basin[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(2): 257–272.
- [6] GUO Rui, ZHANG Gongcheng, ZHANG Jinwei, et al. Fingered intrusion of shallow saucer-shaped igneous sills: Insights from the Jiaojiang Sag, East China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2013, 87(5): 1306–1318.
- [7] 梁锋, 吕庆田, 严加永, 等. 宁芜盆地深部地壳结构和岩浆侵入体形态特征及其对成矿的启示[J]. *地学前缘*, 2017, 24(5): 138–148.
- LIANG Feng, LYU Qingtian, YAN Jiayong, et al. Crustal structure and shape of deep magma intrusion, and their implications for mineralization in Ningwu Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(5): 138–148.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] HANSEN D M Ø, CARTWRIGHT J A, THOMAS D. 3D seismic analysis of the geometry of igneous sills and sill junction relationships[J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2004, 29(1): 199–208.
- [11] 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(增刊1): 33–39, 68.
- WEN Shengming, WANG Jianzhong, WANG Guichong, et al. Development characteristics of igneous rocks and their influence on hydrocarbon accumulation in Tarim Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2005, 40(S1): 33–39, 68.
- [12] 郭光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 510–520.
- WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 510–520.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姚泽伟. 塔里木盆地二叠纪隐伏火成岩时空分布与构造-岩浆作用模型——以塔中及其邻区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- YAO Zewei. Spatial and temporal distribution of unexposed Permian igneous rocks in the Tarim Basin and model of structural-magmatic activities: Case study from the Tazhong and adjacent area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [16] GALLAND O, BERTELSEN H S, EIDE C H, et al. Chapter 5- Storage and transport of magma in the layered crust—formation of sills and related flat-lying intrusions [M]//BURCHARDT S. *Volcanic and Igneous Plumbing Systems*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 113–138.
- [17] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64–77.
- HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 64–77.
- [18] 罗彩明, 梁鑫鑫, 黄少英, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 118–131, 148.
- LUO Caiming, LIANG Xinxin, HUANG Shaoying, et al. Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong uplift and its formation mechanism[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 118–131, 148.
- [19] 吴鲜, 李丹, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北油气田地温场对奥陶系超深层油气的影响——以顺北5号走滑断裂带为例[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 402–412.
- WU Xian, LI Dan, ZHU Xiuxiang, et al. Influence of geothermal field on ultra-deep Ordovician oil and gas in Shunbei field, Tarim

- Basin: A case study of Shunbei No. 5 strike-slip fault [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(3): 402-412.
- [20] 杨赞昊, 高志前, 樊太亮, 等. 下寒武统黑色岩系沉积环境与控烃差异——以塔里木盆地西北缘和东北缘为例[J]. *断块油气田*, 2022, 29(1): 47-52.
- YANG Yunhao, GAO Zhiqian, FAN Tailing, et al. The differences of sedimentary environment and hydrocarbon control of Lower Cambrian black rock series: A case study of northwestern and northeastern margin, Tarim Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(1): 47-52.
- [21] 史江涛, 郝君明, 王小雷. 塔河地区奥陶系鹰山组储层特征及其主控因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2): 348-362.
- SHI Jiangtao, HAO Junming, WANG Xiaolei. Reservoir characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(2): 348-362.
- [22] 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, 61.
- ZHU Yixiu, JIN Zhijun, LIN Changsong, et al. Relations between the early Permian magmatic rocks and hydrocarbon accumulation in the central Tarim [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(1): 50-54, 61.
- [23] 马德波, 崔文娟, 陶小晚, 等. 塔北隆起轮南低凸起断裂构造特征与形成演化[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(5): 647-657.
- MA Debo, CUI Wenjuan, TAO Xiaowan, et al. Structural characteristics and evolution process of faults in the Lunnan low uplift, Tabei uplift in the Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(5): 647-657.
- [24] QIU Huabiao, DENG Shang, CAO Zicheng, 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 刘建章, 蔡忠贤, 滕长宇, 等. 塔里木盆地顺北地区克拉通内走滑断裂带中-下奥陶统储集体方解石脉形成及其与油气充注耦合关系[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 125-137.
- LIU Jianzhang, CAI Zhongxian, TENG Changyu, et al. Coupling relationship between formation of calcite veins and hydrocarbon charging in Middle-Lower Ordovician reservoirs in strike-slip fault zones within craton in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 125-137.
- [28] 程小鑫, 吴鸿翔, 孙大亥, 等. 塔里木盆地西北缘二叠纪基性岩浆侵入事件及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2022, 38(3): 743-764.
- CHENG Xiaoxin, WU Hongxiang, SUN Dahai, et al. The Permian mafic intrusive events in the northwestern margin of the Tarim Basin and their tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(3): 743-764.
- [29] TRUDE J, CARTWRIGHT J, DAVIES R J, et al. New technique for dating igneous sills [J]. *Geology*, 2003, 31(9): 813-816.
- [30] 刘亚雷, 胡秀芳, 黄智斌, 等. 塔里木盆地塔北隆起西部火山岩⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学和地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2423-2434.
- LIU Yalei, HU Xiufang, HUANG Zhibin, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology and geochemistry of the volcanic rocks from the west segment of Tabei uplift, Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2423-2434.
- [31] 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 & Gas Reservoirs*, 2013, 20(3): 64-67.
- [32] DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1): 109-137.

(编辑 张玉银)