https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.029

柴达木盆地北缘中段中–新生代断裂特征与构造演化

张宇轩[1,2],吴 晨[1*],李小刚[3],吴仕虎[4],刘文有[5],王光明[6],李 杰[3],陈宣华[7],丁 林[1,2]

1. 中国科学院青藏高原研究所,北京 100101
2. 中国科学院大学,北京 100049
3. 重庆科技大学石油与天然气工程学院,重庆 401331
4. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院,四川成都 610041
5. 中国石油大庆油田有限责任公司重庆分公司,重庆 402660
6. 中国石油辽河油田分公司开发事业部,辽宁盘锦 124010
7. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

摘 要: 柴达木盆地北缘(柴北缘)记录了青藏高原东北缘中–新生代构造演化的关键信息,但其中生代盆地性质及古近纪构造背景仍存在争议.针对柴北缘中生代盆地性质(拉张/挤压)及古近纪构造背景的争议,在柴北缘中段,开展二维与三维地震资料的精细解释,获得以下结果:(1)基于野外地质调查、地震解释和前人热年代学数据的研究,将本区划分出3个主要构造层,分别为中生代构造层(包括侏罗系(J)+白垩系(K)),古近纪构造层(包括路乐河组(E_{1+2})-下干柴沟组上段(E_3^2))和新近纪至第四纪构造层(包括上干柴沟组(N_1)-第四系(Q));(2)不同的构造层中断裂的主要构造组合样式不同,中生代构造层中主要发育平面式或铲式小型正断层组合样式,古近纪构造层中发育北西向的逆冲叠瓦构造,新近纪至第四纪构造层中发育一系列北西向的逆冲断层形成的逆冲叠瓦构造和近东西向的呈Y字型组合样式的逆冲走滑断裂;(3)根据各时期构造层下的断裂特征,可以将柴北缘中生代以来构造演化主要分为3个阶段,即中生代断陷阶段(晚三叠世–白垩纪)、古近纪弱挤压阶段(27～18 Ma)和新近纪–第四纪强烈压剪阶段(5.1～2.8 Ma).厘清了柴北缘中段不同构造层内断裂组合样式及其时序演化特征,为约束柴达木盆地北缘中生代盆地性质及古近纪构造背景争议提供了新的地震学证据.构造层分段及阶段性挤压–压剪增强特征的识别,有助于深化对柴北缘中段盆–山构造关系及其演化过程的认识,并可为该区构造解析与相关油气勘探提供参考.

关键词: 柴达木盆地北缘;断裂特征;地震解释;构造层;构造演化;构造地质学.

中图分类号: P541 **文章编号:** 1000－2383(2026)07－2626－20 **收稿日期:** 2025－11－30

Structural Characteristics and Tectonic Evolution of Mesozoic-Cenozoic Faults in Central Northern Margin of Qaidam Basin

Zhang Yuxuan[1,2], Wu Chen[1*], Li Xiaogang[3], Wu Shihu[4], Liu Wenyou[5], Wang Guangming[6], Li Jie[3], Chen Xuanhua[7], Ding Lin[1,2]

1. *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 42422206, 42372256).

作者简介: 张宇轩(2000－),男,硕士研究生,构造地质学专业. ORCID: 0009-0003-6654-2005. E-mail: zhangyuxuan@itpcas.ac.cn

* **通讯作者:** 吴晨, ORCID: 0000-0003-0647-3530. E-mail: wuchen@itpcas.ac.cn

引用格式: 张宇轩,吴晨,李小刚,吴仕虎,刘文有,王光明,李杰,陈宣华,丁林,2026.柴达木盆地北缘中段中–新生代断裂特征与构造演化.地球科学,51(7):2626－2645.

Citation: Zhang Yuxuan, Wu Chen, Li Xiaogang, Wu Shihu, Liu Wenyou, Wang Guangming, Li Jie, Chen Xuanhua, Ding Lin, 2026. Structural Characteristics and Tectonic Evolution of Mesozoic-Cenozoic Faults in Central Northern Margin of Qaidam Basin. *Earth Science*, 51(7): 2626－2645.

3. *College of Petroleum and Natural Gas Engineering*, *Chongqing University of Science and Technology*, *Chongqing* 401331, *China*
4. *Exploration and Development Research Institute*, *PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company*, *Chengdu* 610041, *China*
5. *Chongqing Branch of Daqing Oilfield Co., Ltd.*, *PetroChina*, *Chongqing* 402660, *China*
6. *Development Department of PetroChina*, *Liaohe Oilfield Company*, *Panjin* 124010, *China*
7. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*

Abstract: The northern margin of the Qaidam Basin (NQB) preserves key records of the Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the northeastern Tibetan Plateau. However, significant controversies remain regarding the nature of the Mesozoic basin (extensional vs. compressional) and the tectonic setting during the Paleogene. To address these issues, this study conducts detailed interpretation of two-dimensional and three-dimensional seismic data in the central segment of the NQB, yielding the following results. Integrating thermochronologic constraints, seismic reflection geometries, and regional analyses of fault activity, the structural succession of the area can be subdivided into three principal tectonic layers: the Mesozoic layer (Jurassic-Cretaceous), the Paleogene layer (Lulehe Formation (E_{1+2}) to the upper part of the Lower Ganchaigou Formation (E_3^2)), and the Neogene-Quaternary layer (Upper Ganchaigou Formation (N_1) to Quaternary). Fault assemblages differ markedly among the tectonic layers. The Mesozoic layer is characterized by small-scale planar or listric normal faults; the Paleogene layer exhibits NW-trending imbricate thrust systems; and the Neogene-Quaternary layer is dominated by NW-trending thrust-related imbricate structures together with near-E-W-trending Y-shaped thrust-strike-slip faults. Based on the fault architecture within each tectonic layer, the tectonic evolution along the northern Qaidam Basin margin since the Mesozoic can be categorized into three major stages: a Mesozoic rifting phase (Late Triassic-Cretaceous), a Paleogene weak compressional phase (27−18 Ma), and a Neogene-Quaternary intense transpressional phase (5.1−2.8 Ma). This study clarifies the fault assemblage styles and their temporal evolution within different tectonic layers in the central segment of the northern Qaidam margin, providing new seismic evidence to constrain debates on the Mesozoic basin nature and Paleogene tectonic background of the northern Qaidam Basin. The identification of tectonic layering and stage-dependent intensification of compression and transpression also offers key constraints on basin-mountain coupled deformation mechanisms associated with the northward expansion of the northeastern Tibetan Plateau during the Cenozoic, and provides a valuable tectonic framework for structural analysis and resource exploration in the northern Qaidam margin.

Key words: northern margin of Qaidam Basin; fault architecture; seismic interpretation; tectonic layering; tectonic evolution; structural geology.

0　引言

柴达木盆地作为青藏高原北部巨型盆山体系的核心组成部分,其构造演化过程记录了青藏高原隆升与板块相互作用的关键信息,一直是地质学界研究的热点区域(Yin and Harrison, 2000; Tapponnier *et al.*, 2001; 汤良杰等,2002a,2002b; 周建勋等,2003; 楼谦谦等,2009; Wu *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2021; 吴晨等, 2023; Hou *et al.*, 2024; Zeng *et al.*, 2025). 盆地北缘构造带因处于祁连山、阿尔金山与盆地的过渡带,受多期构造运动叠加影响,形成了复杂的断裂系统和构造格局,不仅控制着区域地层沉积与矿产资源分布,更成为解析青藏高原北部动力学过程的重要窗口(Jolivet *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2011, 2016, 2021a; 孙国强等,2012; Cheng *et al.*, 2017, 2019; 李猛等,2018; 吴晨等,2023).

近年来,针对柴达木盆地北缘的构造研究已取得诸多进展:学者们通过地层分析、同位素测年和地震剖面解译,揭示了盆地基底性质、中新生代地层序列及主要断裂活动时代(翟光明等,2002;姚宏鑫等,2017; Yang *et al.*, 2024);通过构造物理模拟与热年代学分析,探讨了阿尔金断裂走滑作用对盆地北缘变形的远程效应(Cowgill *et al.*, 2000,2003; Wu *et al.*, 2021a; Guan *et al.*, 2025);同时,对逆冲断层系的展布特征、褶皱样式及其与油气成藏的关系也开展了深入探讨(汤良杰等,2002a; 管树巍等,2017a; Li *et al.*, 2023). 然而,对于北缘中段绿梁山山前构造带这一关键区域,仍存在以下问题:一是不同构造层断裂的多期活动特征与时空演化序列尚未完全厘清,尤其是中生代伸展构造向新生代挤压构造的转换过程缺乏精细约束;二是逆冲断裂与

走滑断裂的叠加机制及其对隆-凹格局形成的控制作用尚未形成系统认识，尽管已识别出北西向逆冲叠瓦构造与近东西向Y字型逆冲走滑断裂的组合样式（汤良杰等，2002a），但两类断裂的空间配置规律、运动学分量分配及其对马海-大红沟菱格状隆-凹的控制机理尚未形成统一模型；三是区域构造事件与青藏高原隆升阶段的耦合关系仍需通过具体构造单元的研究进一步验证.

基于此，本文以柴达木盆地北缘中段绿梁山山前构造带为研究对象，通过野外地质调查、地震剖面精细解译及热年代学数据综合分析，重点探讨以下科学问题：（1）中新生代构造层的划分及其断裂系统的时空分布特征；（2）不同时期断裂的运动学性质、组合样式及其形成的动力学背景；（3）区域构造演化过程与青藏高原北部隆升的响应关系.研究成果不仅可为柴达木盆地北缘构造动力学模型的完善提供关键约束，亦能为类似盆山过渡带的多期构造叠加研究提供参考范式.

1 区域地质概况

柴达木盆地北缘构造带西起阿尔金山，东至鄂拉山，北临祁连山（以柴北缘断裂为界），南接柴达木盆地，总体呈WNW-ESE向展布，长约750 km，宽约50 km，面积可达37 000 km^2（图1、图2）.柴北缘逆冲断层系处在祁连南山至柴达木盆地北缘的广大地区，主要包括赛什腾山（赛北）逆冲断层带、赛南逆冲断层带、绿梁山逆冲断层带、柴达木山逆冲断层带、锡铁山逆冲断层带、埃姆尼克山、欧龙布鲁克逆冲断层带、长山背斜、达浪和冷湖背斜（李春昱等，1980；Yin and Harrison，2000；Gehrels *et al.*，2003；Wu *et al.*，2016；吴晨等，2023）.断裂带下盘主要由新生代地层构成，发育一系列褶皱构造，褶皱构造具有反“S”型展布规律（黄汉纯等，1996）.柴达木盆地北缘逆冲断层系形成于50～45 Ma期间（Jolivet *et al.*，2001；Yin *et al.*，2002，2008a，2008b）.逆冲推覆作用形成构造岩片，互相叠置，形成菱形块状构造.

研究区位于柴达木盆地北缘逆冲断裂带中段绿梁山的山前，是柴北缘典型的山前构造带之一（图1、图2）.其北侧以近东西走向的马仙断裂为界，与赛什腾凹陷相邻；东接绿梁山造山带，其外为大柴旦凹陷；南侧以陵间断裂为界，毗邻伊北凹陷；西南为三湖凹陷带，东南与锡铁山相接，构成一个三角形形态的次级构造单元（汤良杰等，2002b）.区内主要发育一系列北倾的基底卷入式逆冲断层，是祁连山-南山逆冲断层带的南延部分.这些断裂将古生代变质岩及含超高压榴辉岩的片麻岩推覆至新生代地层之上，构成叠瓦状构造系统，形成如绿梁山逆冲断层带等主要构造（王根厚等，2001；陈宣华等，2010）（图2）.

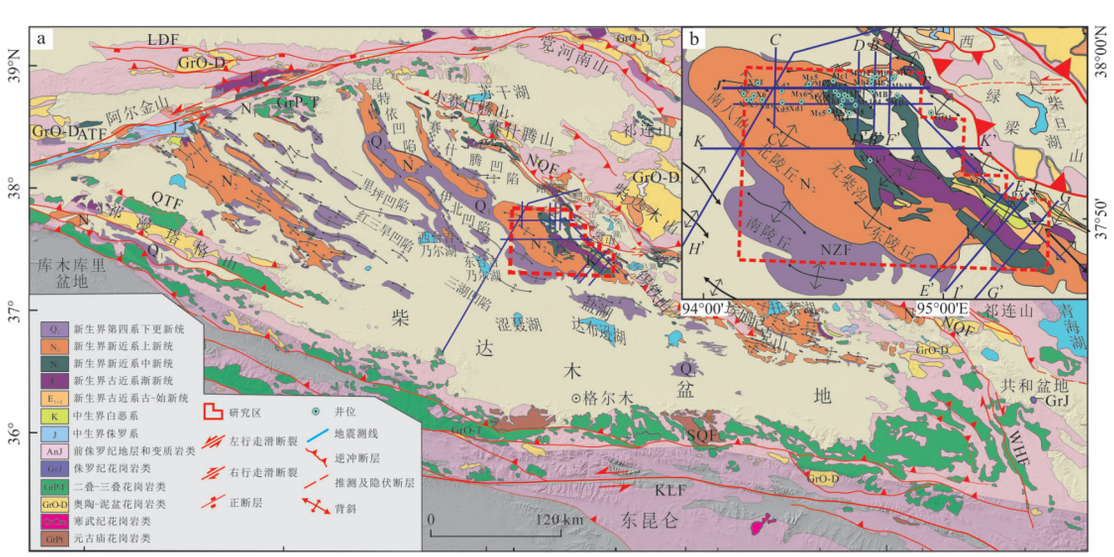


图1 研究区与测线位置

Fig.1 Survey lines and their location within the study area

据Wu *et al.*（2019）；Li *et al.*（2024b）修改.NZF.北宗务隆山断裂带；NQF.柴北缘断裂带；QTF.祁漫塔格北缘断裂带；SQF.柴达木南缘断裂带；KLF.昆仑断裂带；ATF.阿尔金断裂带；WHF.哇洪山断裂带（温泉断裂带）；LDF.拉配泉拆离断层

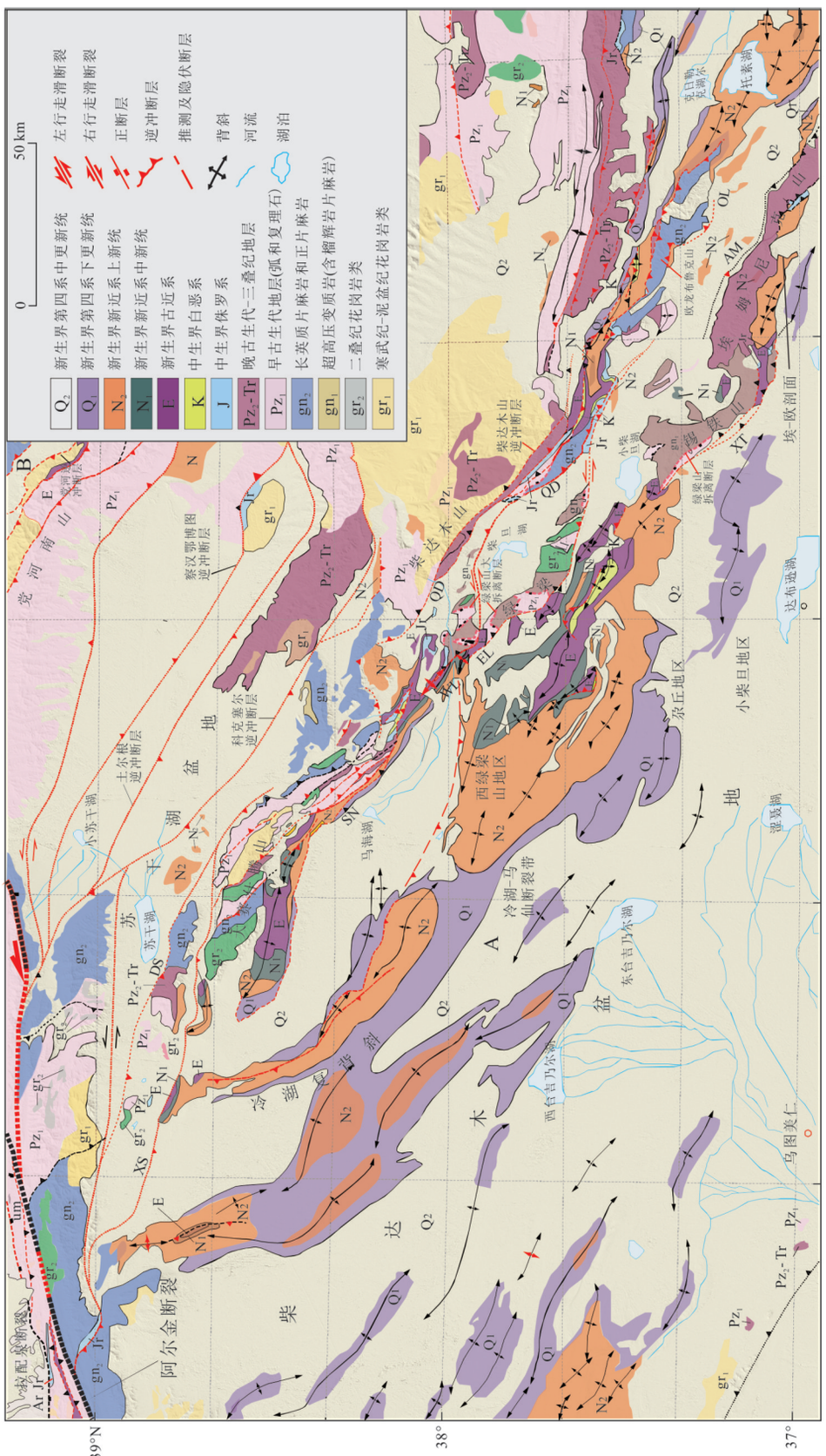


图2　柴达木盆地北缘构造地质图

Fig.2　Tectonic geologic map of the northern margin of the Qaidam Basin

据 Wu *et al*., 2017, 2021b; Gao *et al*., 2013; Zuza *et al*., 2016. 柴北缘逆冲断层系:DS.大赛北逆冲断层;XS.小赛北逆冲断层;SN.赛南逆冲断层;QD.柴达木山逆冲断层;WL.西绿梁山逆冲断层;EL.东绿梁山逆冲断层;XT.锡铁山逆冲断层;OL.欧龙布鲁克逆冲断层;AM.埃姆尼克山逆冲断层;CSA.长山背斜;DLA.大浪背斜

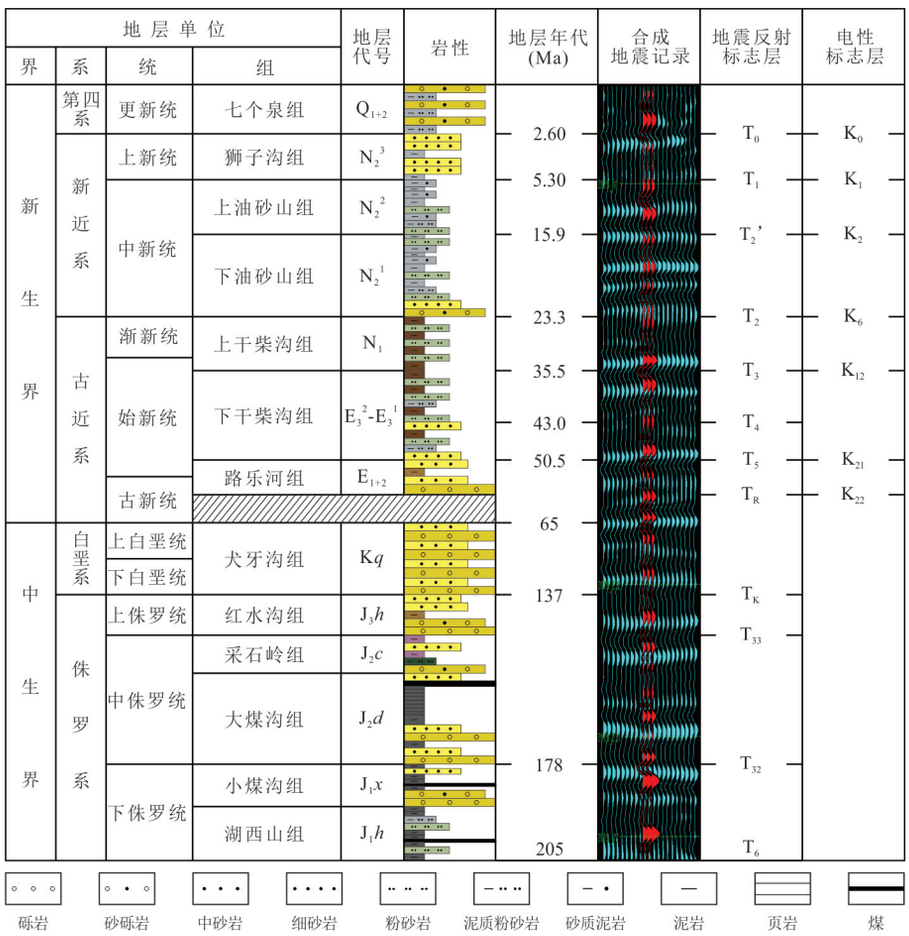


图 3 研究区地层综合柱状图(杨飞等,2013;Wu *et al.*, 2021b)

Fig.3 Composite stratigraphic column of the study area

研究区地层基底为前震旦纪结晶岩系,局部含奥陶纪-志留纪高级变质岩,以及震旦纪-三叠纪中的未变质及浅变质基底,属于双层结构基底(翟光明等,2002).中生代地层发育侏罗纪和白垩纪,其中侏罗系地层在柴北缘的分布范围要远大于盆地其他地区.中、上侏罗统基本上是连续覆盖于下侏罗统之上,具有较好的沉积和继承性,表现出连续沉积的过程.侏罗系地层中,湖西山组和小煤沟群形成于下侏罗统,大煤沟组为中侏罗统,采石岭组和红水沟组为上侏罗统(姚宏鑫等,2017)(图 3).新生代地层广泛发育,是盆地充填的主体,自下而上包括路乐河组($E_{1+2}l$)、下干柴沟组(E_3xg)、上干柴沟组(N_1sg)、下油砂山组(N_2^1xy)、上油砂山组(N_2^2sy)、狮子沟组(N_2^3s)和七个泉组($Q_{1+2}q$)(图 3).

其中路乐河组($E_{1+2}l$)以紫红色砾岩、砂岩为主,夹少量泥岩,属干旱-半干旱环境下的山麓洪积-河流相沉积,反映盆地初始充填期的粗碎屑堆积(孟万斌等,2010);下干柴沟组(E_3xg)的下段属于灰绿色砂岩与深灰色泥岩互层,局部含石膏,为湖相-三角洲相沉积,上段属于棕红色泥岩夹砂岩,含碳酸盐结核,气候趋于干旱,沉积范围扩大(彭勇辉等,2015);上干柴沟组(N_1sg)以灰绿色、灰白色砂岩与泥岩不等厚互层为主,夹薄层灰岩或介壳层,属浅湖-半深湖相沉积,反映相对湿润的湖盆扩张期(吴颜雄等,2017);下油砂山组(N_2^1xy)以棕褐色砂岩、砾岩与泥岩互层为主,含油砂(命名来源),为河流-扇三角洲相沉积,指示盆地边缘碎屑输入增强;上油砂山组(N_2^2sy)以灰黄色砾岩、砂岩为主,夹棕红色泥岩,砾石分选差、磨圆度低,属山麓洪积相,反映构造活动加剧导致的粗碎屑堆积(袁四化等,2008);狮子沟组(N_2^3s)以厚层状砾岩夹砂岩透镜体为主,颜色以灰褐、灰黑色为主,属强烈挤压背景下的快速堆积,部分地区含膏盐层(王伟涛等,2022;许梦强等,2024);七个泉组($Q_{1+2}q$)以土黄色粉砂质泥岩、砂岩与砾岩互层为主,含钙质结核,为冲洪积-湖沼相沉积,气候干旱

化加剧;达布逊盐桥组($Q_{3+4}d$)以盐岩、膏盐层为主,夹薄层泥质粉砂岩,属盐湖相沉积,是柴达木盆地现代盐湖演化的直接记录(管树巍等,2017b).

2　数据与方法

2.1　数据特征

研究区综合采用钻井、二维与三维地震资料、野外地质观测以及区域热年代学资料,以共同约束构造层划分、断裂期次判定与构造演化分析.研究区共有钻井 35 口、二维地震测线 3 条,同时覆盖一部分三维地震资料.二维地震测线累计长度约 480 km,共 3 条,单条长度分别约为 150 km、170 km 和 160 km,地震道间距 50 m,覆盖次数相对较低,仅 24 次,目的层主频为 25 Hz,有效频带 5～64 Hz.区内目的层起伏较大,3 200 ms 以浅地震地层特征同相轴反射特征相对清楚,地层连续性相对较好,3 200 ms 以深地震反射特征连续性弱,反射不清晰,但可以用于解译盆地构造目的层地层格架;三维地震数据覆盖面积约 220 km^2,主要分布于南八仙-马海构造带及大红沟地区.资料覆盖次数 60 次,目的层主频不足 20 Hz,频带宽度也相对较小,8～45 Hz.目的层受构造挤压影响地震地层同相轴呈断续反射特征,能反映北西向逆冲叠瓦构造框架.研究区 35 口钻井主要分布于南八仙-马海构造带、大红沟凹陷与绿梁山前带,钻井深度普遍为 2 800～4 500 m,其中马参 1 井深度达 4 200 m,可穿透中生代侏罗系及古近系路乐河组,为地震层位标定与构造层时代约束提供了关键依据.除地震钻井资料外,本文还综合利用野外地质调查资料与露头构造-地层接触关系,验证地震解释中识别的不整合界面、断裂切割关系与逆冲叠覆等关键几何证据,从而提升构造层划分与断裂期次判定的可靠性.同时,本文引入区域低温热年代学资料作为时间约束,用于限定柴北缘中段关键构造事件(如新生代早期逆冲活动、渐新世-中新世期间的构造再活化及晚新生代走滑分量增强等)的时代范围,并与地震解释获得的断裂-构造层关系进行交叉验证.

2.2　基于地震精细解译的构造层识别

本文基于覆盖全区的二维与三维地震资料开展地层追踪、断裂解释以查明地下地层分布及构造形态、埋藏深度、接触关系等,三维地震地层和断层解释密度分别为 40×40 和 20×20.首先,通过对过井地震剖面进行层位标定,将层位精确归位到具体的构造层中;其次,根据地震剖面中地震反射同相轴的错断、扭曲、终止等特征重点识别不同深度层次的断裂;最后,在三维空间内,通过地层和断层的空间关系,进一步修正断裂的平面展布规律、剖面组合样式以及产状要素等,建立了“不整合界面-断裂关系-构造样式”三位一体的构造层划分方法.具体流程如下:

(1) 不整合界面识别与构造层边界厘定.通过全区骨干剖面的反射同相轴追踪,在图中虚线标示出三期区域性不整合界面(图 4),构成构造层划分的核心标志,分别为 J/K-E 不整合面、E_3^2-N_1不整合面和 N_2^3-Q 不整合面.其中 J/K-E 不整合面表现为侏罗系(J)顶部的削截反射与古近系路乐河组(E_{1+2})底部的楔状上超充填,界面处可见强振幅反射终止;E_3^2-N_1不整合面对应下干柴沟组上段(E_3^2)膏盐岩的褶皱变形,上覆上干柴沟组(N_1)以角度不整合覆盖,底砾岩段呈杂乱强反射;N_2^3-Q 不整合面表现为狮子沟组(N_2^3)逆冲断裂带内反射破碎、连续性较差的地震响应特征,其上被第四系七个泉组(Q)水平层理平行覆盖且无明显变形.

(2) 断裂切割关系与发育期次限定.基于三维空间断裂追踪,结合平面-剖面耦合分析厘定断裂活动与构造层的时序关系:平面展布上(图 5),中生代断裂呈近南北向零散分布,古近纪断裂为北西向平行排列,新近纪断裂形成北西向与近东西向 Y 字型走滑组合;剖面交切关系显示,中生代正断层被晚侏罗世逆冲断层切割反转,古近纪逆冲断层被新近纪走滑断层改造,且均被上覆不整合面所覆盖(图 4).

(3) 断裂构造样式的构造层响应.不同构造层中断裂组合样式表现出明显差异,这为构造层划分提供了重要判据(图 4、图 5).例如,中生代构造层以平面式或铲式正断层为主,常形成半地堑或箕状断陷,其地震反射表现为断裂控制下的地层厚度变化与同相轴错断;古近纪构造层主要发育北西向高角度逆冲断层,构成叠瓦状构造,其地震反射特征以断裂密集分布及同相轴强烈错移为主;新近纪-第四纪构造层则以逆冲-走滑断裂组合为特征,地震剖面上常表现为多组断裂叠加及地层反射形态的明显扰动,局部可见与断裂活动相关的褶皱变形(图 4).

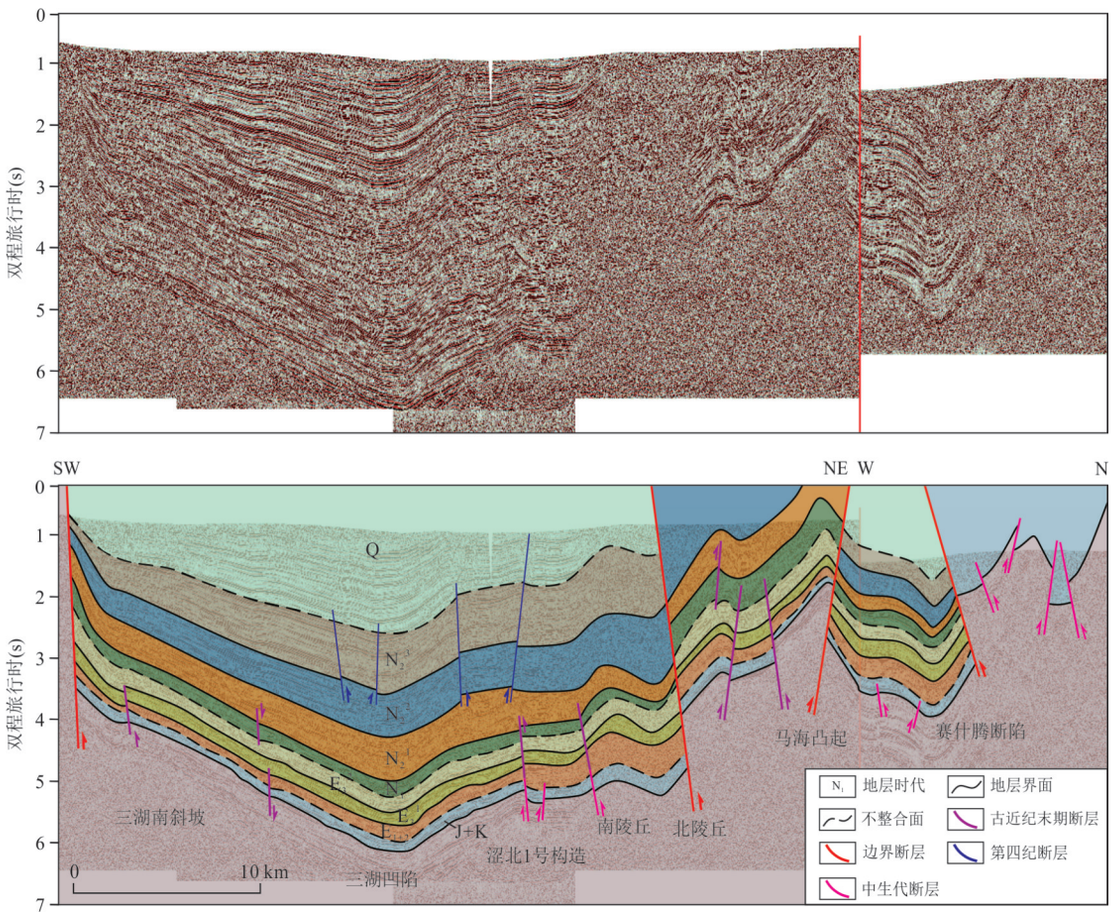


图 4 *HH′*地震解释剖面

Fig.4 Seismic interpretation of profile *HH′*

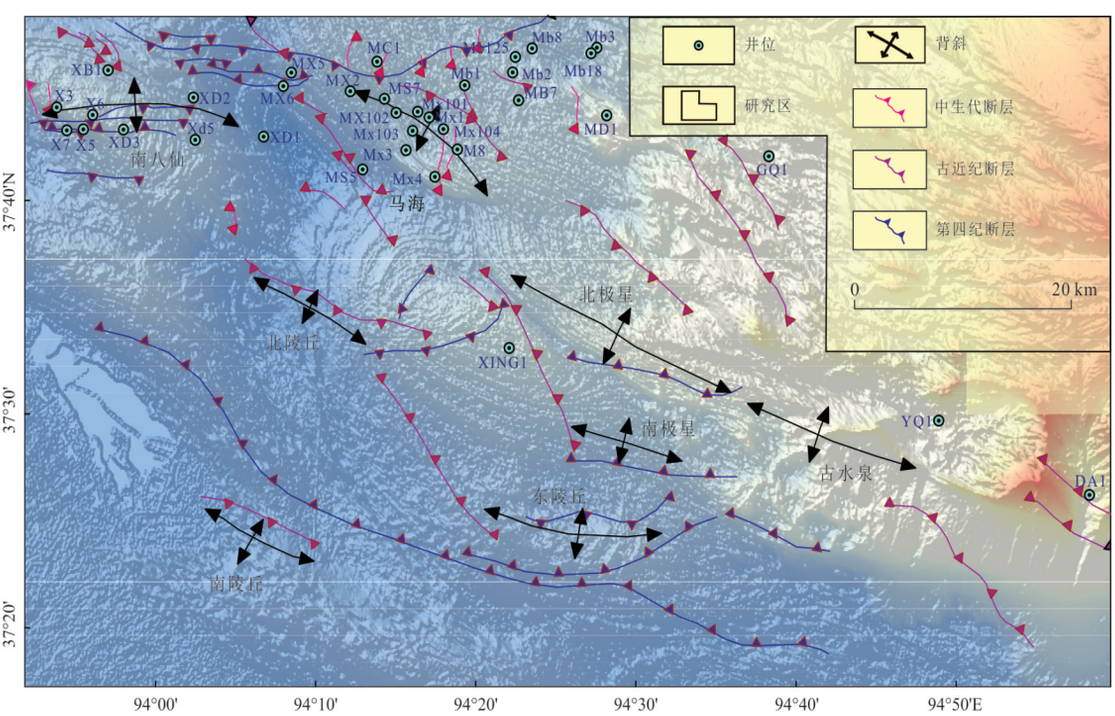


图 5 研究区断裂构造纲要图

Fig.5 Structural outline map of fractures in the study area

3　研究区断裂特征与演化过程

3.1　构造层划分

3.1.1　骨架剖面揭示的地质结构　研究区构造层的划分以不整合面为依据,通过地震剖面与野外观察识别出3个区域性不整合界面(图4),其核心标志为界面之下地层的削截与界面之上的上超现象,横向展布稳定且对应明确的区域构造事件.白垩纪晚期不整合面位于中生代构造层顶部,其界面之下侏罗系-白垩系地层发生强烈削截,之上古近系路乐河组呈区域性上超;古近纪末期不整合面位于下干柴沟组上段(E_3^2)顶部,其界面之下古近系地层,可见褶皱变形与削截,构造层之上的上干柴沟组(N_1)以角度不整合覆盖;新近纪末期不整合面位于狮子沟组(N_2^3)顶部,界面之下新近系地层普遍发生褶皱与逆冲叠覆,之上第四系七个泉组(Q)呈水平覆盖.

3.1.2　断裂活动时间　结合热年代学数据(图6),柴北缘中段大红沟地区发育两期典型的逆冲断裂,早期应发育于新生代早期45~50 Ma,与柴达木北缘断裂同期(图6)(Wu *et al.*, 2021a);晚期由于逆冲至上干柴沟组之上(图6),所以该断裂构造应晚于渐新世,根据热年代学数据显示,应为27~18 Ma(图6)(Wu *et al.*, 2021a).柴北缘的断裂构造在新生代晚期可明显见到走滑分量,与中新世晚期青藏高原北部右行走滑断裂的发育有关(图6),如温泉断裂和日月山断裂,热年代学数据显示时限为10~5 Ma(图6)(Wu *et al.*, 2021a).

3.1.3　野外特征　柴达木盆地现今保存着完整的新生代沉积记录,一直是研究的热点地区(Yin *et al.*, 2000).其中,路乐河组为一套棕红色、褐色砂质泥岩,含钙质结核,超覆于中生代地层之上(图7a).柴北缘中段马海-大红沟凸起地层出露齐全,新生界自下而上各组地层均有出露,在大红沟背斜地区白垩系甚至出露至地表,白垩系地层中发育的宽缓背斜揭示了挤压变形的发育(图7b).柴北缘大煤沟地区发育两期典型的逆冲断裂,早期应发育于新生代早期45~50 Ma(图6、图7c),元古代变质岩逆冲到侏罗系地层之上,逆断层断层面沿着煤层发育(图7c、7d).晚期一是元古代变质岩逆冲到上干柴沟组地层之上(图7e),二是侏罗系地层逆冲到上干柴沟组沉积之上,断层面沿着煤层发育(图7f),所以该期断裂构造应该晚于渐新世,其中上干柴沟组以构造窗形式发育(图7e、7f).

综合野外地质观察、地震剖面解释及热年代学数据,将研究区分为3个主要构造层,分别是中生代构造层(侏罗系(J)+白垩系(K)),古近纪构造层(路乐河组(E_{1+2})-下干柴沟组上段(E_3^2))和新近纪至第四纪构造层(上干柴沟组(N_1)-第四系(Q)).部分断裂活动时间较早,主要发生在中生代晚期到新生代早期,处于中生代构造层中,将其称为中生代断层,因其受后期构造的强烈改造,现今的断层几何特征已不能代表其活动时的产状;新生代主要发育两期具有代表性的逆冲断裂构造,第一期为古近纪末期断层,发育于古近纪构造层,改造了早期地层和构造,被上干柴沟组不整合覆盖(管树巍等,2017b);第二期为第四纪断层,处于新近纪至第四纪构造层中,大部分断裂活动时间集中在上新世,

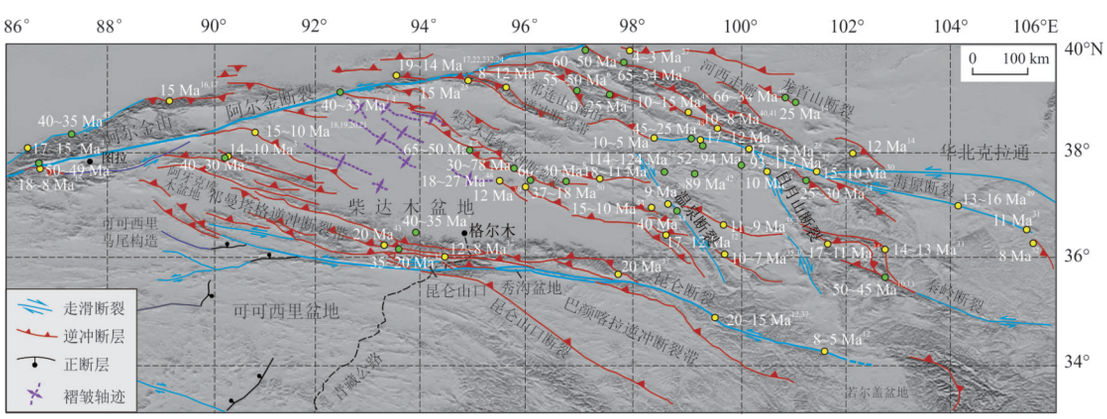


图6　青藏高原北缘构造热年代数据分布

Fig.6　Distribution of tectono-thermochronological dataset in the northern margin of the Tibetan Plateau

图中标注1~42请参见Wu et al, 2021a; 43见Wu *et al.*, 2021b; 44见Li *et al.*, 2023; 45见Gao *et al.*, 2022; 46见Tao *et al.*, 2025; 47见Wang *et al.*, 2024; 48见Li *et al.*, 2024a; 49见Liu *et al.*, 2024; 50见Yu *et al.*, 2025

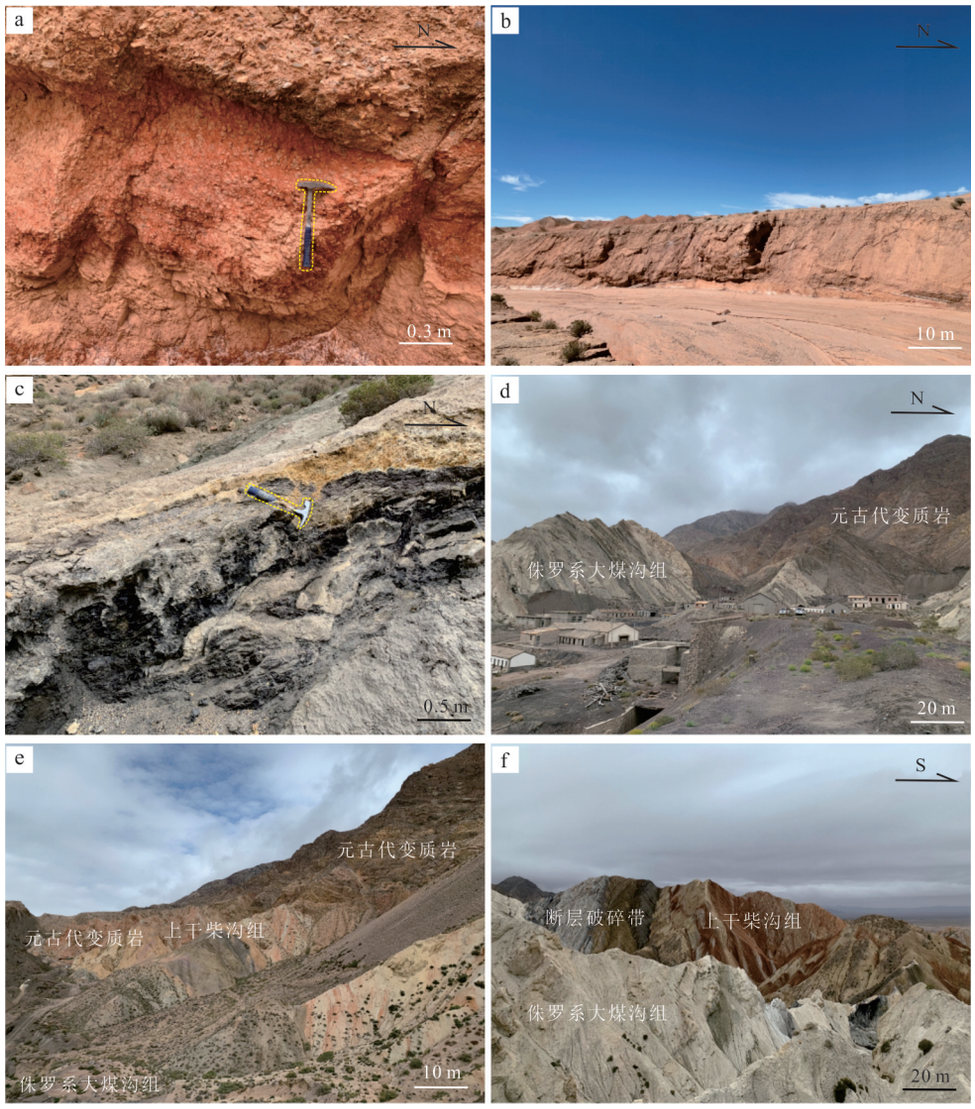


图 7 野外记录照片

Fig.7 Field-recorded photos

自下油砂山组以后开始活动,到狮子沟组活动强烈.

3.2 各构造层断裂特征分析

研究区断裂系统在垂向上表现出显著的构造分层性,其断裂组合样式的差异反映了自中生代以来区域应力场由伸展向挤压、再向走滑-挤压复合体制的阶段性转换(Yin *et al.*, 2008a; Wu *et al.*, 2021a).综合地震剖面、野外露头及区域地层对比可知,中生代构造层以平面式与铲式小型正断层为主要特征,显示出典型的伸展背景;古近纪构造层转入北西向逆冲叠瓦构造发育阶段,其断层规模虽不大但排列密集,体现了弱挤压作用的初步建立;新近纪-第四纪构造层中,构造样式进一步复杂化,不仅表现出强烈缩短作用导致的北西向逆冲叠瓦构造,还出现近东西向呈 Y 字型的逆冲-走滑复合断裂系统,代表区域应力场进入强烈压剪阶段(Tapponnier *et al.*, 2001).上述垂向变化不仅反映了构造应力场的调整与强化,也决定了当前盆地内隆-凹构造格局的空间差异性.

3.2.1 中生代构造层断裂特征 中生代构造层(J+K)反映了研究区早期以伸展为主的构造格局,其内部发育大量平面式与铲式小型正断层(图 8、图 9),构成一系列半地堑式断陷组合(曾联波等,2001).在地震剖面 AA'(图 8)与 BB'(图 9)中,正断层普遍呈向下弯曲的铲式几何形态,上盘沿断面滑落,显示出典型拉张沉积边界的构造响应.这些断层规模虽小,但间距密集、数量庞大,对早、中侏罗世伸展沉积格局具有重要控制作用(Wu *et al.*, 2011).进入晚侏罗-白垩纪阶段,区域构造场由早期拉张转为整

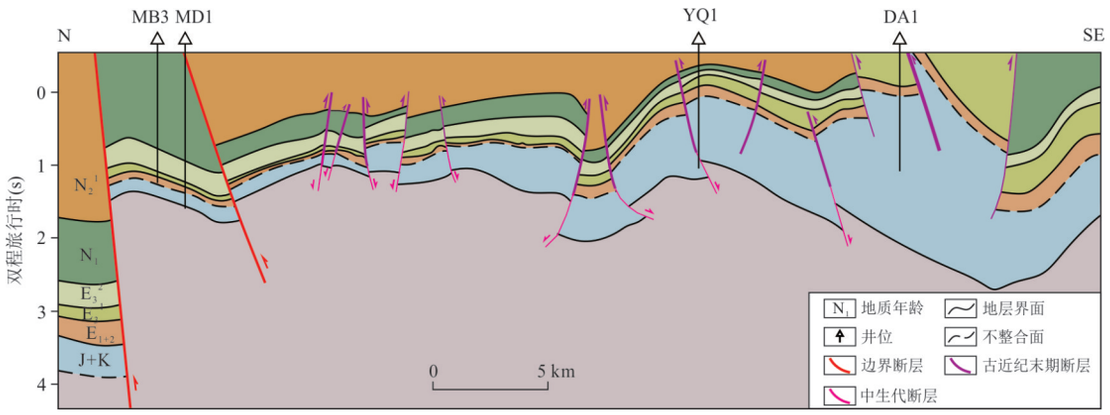


图 8　AA'地震解释剖面

Fig.8　Seismic interpretation of profile AA'

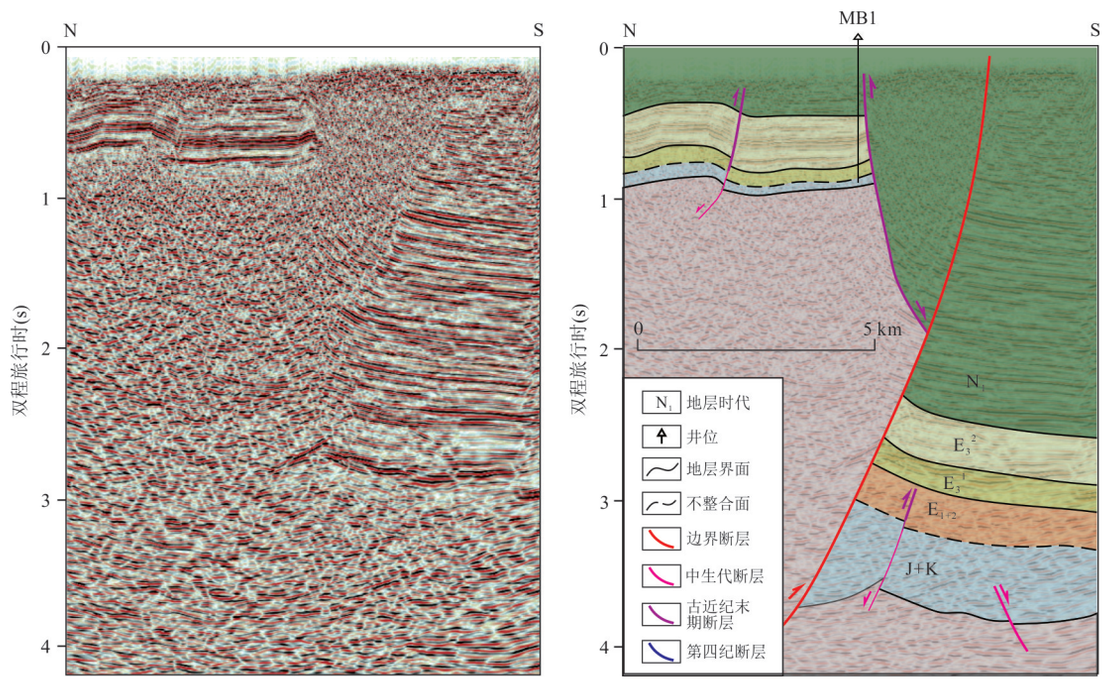


图 9　BB'地震解释剖面

Fig.9　Seismic interpretation of profile BB'

体抬升与弱挤压,导致部分正断层发生反转.在地震剖面中表现为上盘地层被挤压弯曲、原伸展断裂面被改造(图 8、图 9),说明伸展构造体系受到后期构造重组的强烈影响.此外,受晚白垩世盆地抬升与剥蚀作用影响,中生代与新生代地层间形成明显不整合界面(曹珂,2013),进一步证明本期构造层经历了伸展之后的反向构造叠加.总体来看,中生代构造层断裂体系以伸展性正断层为主,其后期反转记录了区域构造体制由伸展调转为挤压的早期迹象,为上覆构造层的逆冲与走滑变形奠定了结构基础.

3.2.2　古近纪构造层断裂特征　古近纪构造层(E_{1+2}-E_3^2)处于区域构造从伸展向挤压转换的关键时期.断裂主要形成于下干柴沟组上段与上干柴沟组沉积之间(27~18 Ma),属于“古近纪末期逆冲断层”,代表区域弱挤压的建立(Cheng *et al.*, 2019).在地震剖面 CC'(图 10)与 DD'(图 11)中可见多条陡倾(倾角>50°)逆冲断层,如 Ef1、Ef2、Ef3,它们切割 J+K 以及 E_{1+2}-E_3^2地层,走向主要呈 NW-EW 向,构成北西向高角度逆冲断裂组合(王彦博等,2019).其中 Ef1 是控制南八仙背斜发育的重要基底断裂,其上下盘中生代厚度差异明显,指示其在中生代已活动,古近纪时期重新被激活(图 10).

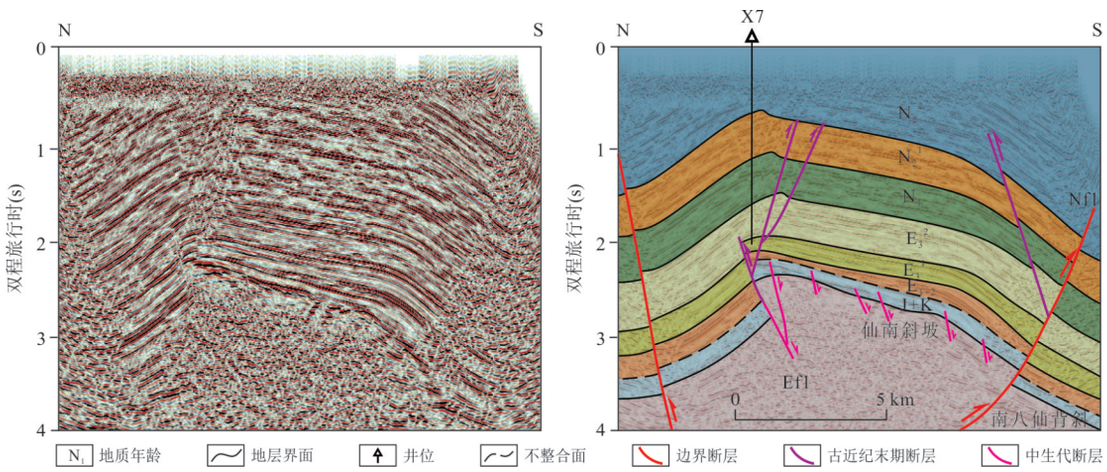


图 10 *CC′*地震解释剖面

Fig.10 Seismic interpretation of profile *CC′*

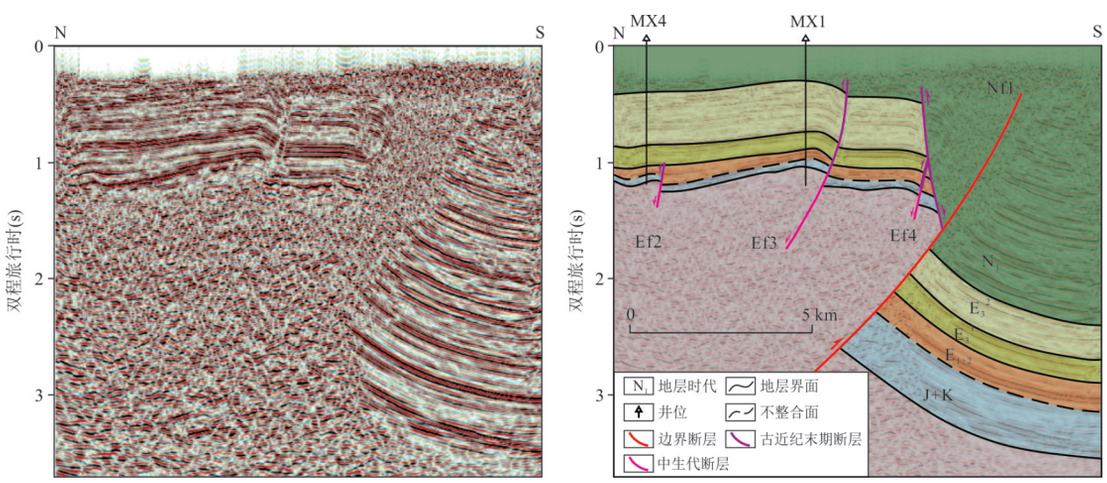


图 11 *DD′*地震解释剖面

Fig.11 Seismic interpretation of profile *DD′*

二维剖面 *EE′*(图 12)显示 Ef4～Ef7 等逆冲断层密集排列,走向 NW,倾向 NE,形成高角度逆冲叠瓦构造带.相关褶皱不显著,但 NE-SW 向挤压特征明显(Wu *et al.*, 2016).古近纪末期构造变形虽较弱,但其继承性强,尤其在大红沟地区,上覆地层发生明显剥蚀与再旋回(桑胜萍等,2024),进一步表明该构造层对后期构造格局具有重要的影响.

总体来看,古近纪构造层断裂体系代表区域进入初次挤压阶段,其叠瓦逆冲系统为后期新近纪的强烈压剪变形提供了结构基础.

3.2.3 新近纪-第四纪构造层断裂特征 新近纪-第四纪构造层(N_1-Q)是研究区构造变形最强烈的阶段,其断裂体系呈现明显的逆冲与走滑叠加特征,是青藏高原北缘强烈构造重组的直接记录(Tapponnier *et al.*, 1990;Wu *et al.*, 2021b).二维测线剖面 *GG′*(图 13)与三维测线剖面 *FF′*(图 14)清楚显示,该构造层中普遍发育两类典型构造样式:

(1)北西向逆冲叠瓦构造体系.图 14 显示,马仙断裂次级断裂 Nf1 为区内晚期最强烈的活动断裂,其断面高角度倾向南(50°～55°),切割 J+K、E_{1+2}、E_3^1、E_3^2、N_1等多套地层,上盘形成显著的断层传播褶皱,表明新近纪以来区域缩短作用大幅增强.

(2)近东西向 Y 型逆冲-走滑复合断裂系统.图 13 与图 14 均显示,本期断裂体系中大量近 EW 向断裂呈与 NW 向逆冲断裂组合的 Y 型分叉状结构,这些断裂具有明显的走滑分量,反映区域已进入走滑-挤压复合应力场.该结构样式与东昆仑-阿尔金走滑断裂带的晚新生代活动具有明确耦合关系(Jolivet *et al.*, 2003;Zuza and Yin, 2016).

新近纪以来的强烈变形导致地层广泛抬升、削

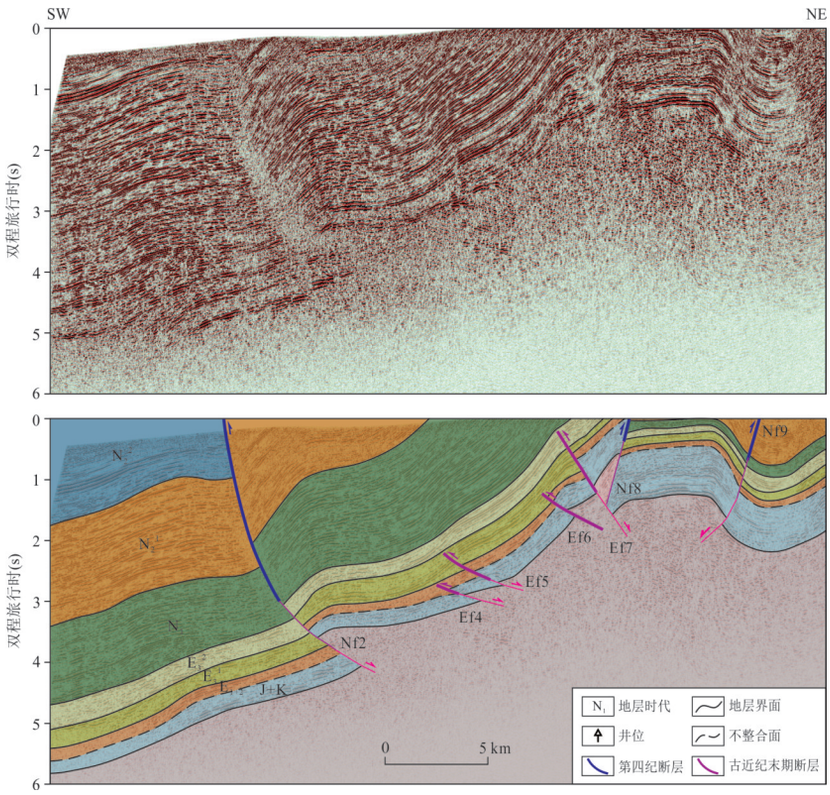


图 12　*EE′*地震解释剖面

Fig.12　Seismic interpretation of profile *EE′*

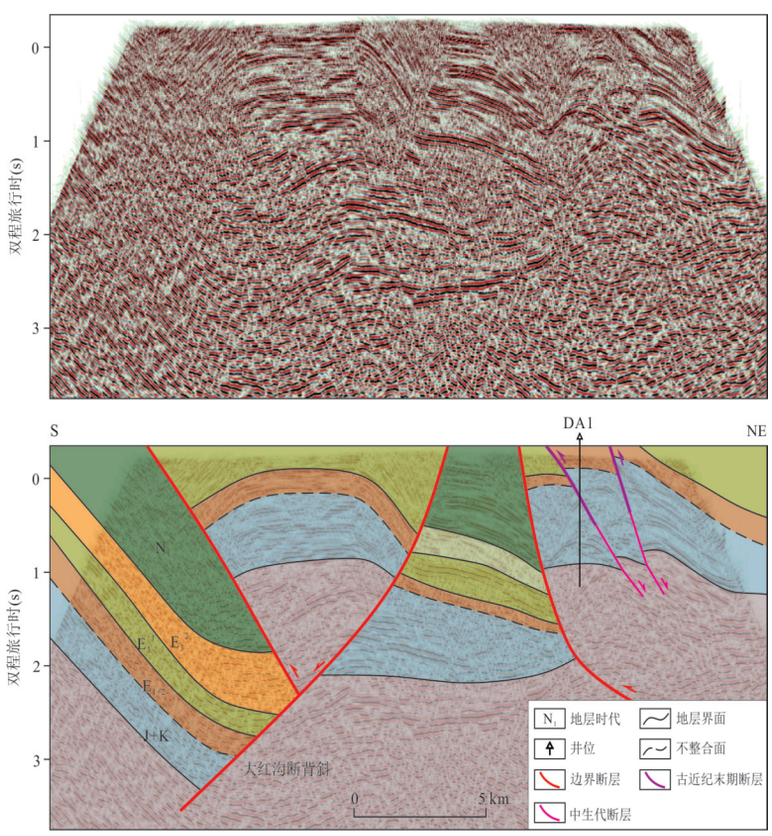


图 13　*GG′*地震解释剖面

Fig.13　Seismic interpretation of profile *GG′*

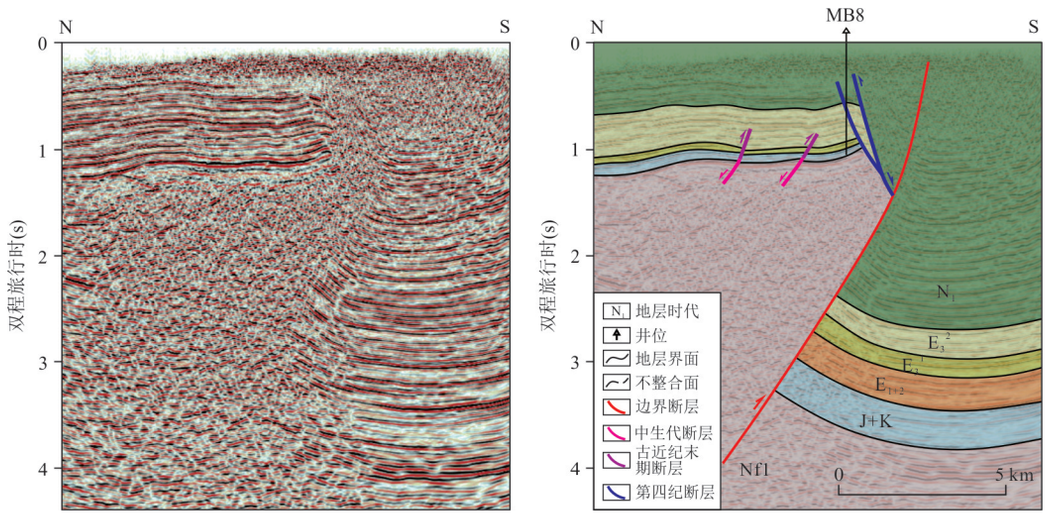


图 14 FF'地震解释剖面

Fig.14 Seismic interpretation of profile FF'

蚀以及褶皱紧闭,并促成研究区内部形成菱格状隆-凹构造格局.上述特征表明,新近纪-第四纪构造层是研究区构造演化中压剪变形最显著的阶段,也是现代构造格局最终定型的关键时期.

4 讨论

4.1 柴北缘中段断裂构造特征和形成过程

不同构造层中断裂的构造组合样式存在显著差异,反映了区域构造应力场的阶段性演化特征(Li *et al.*, 2021).这种阶段性差异不仅体现应力体制从伸展到挤压、再到压剪复合的演化,也反映了区域应变在盆地边界逆冲推覆带与走滑构造带之间的分配与耦合过程,即在持续汇聚背景下,挤压缩短与走滑剪切可在不同时段以不同权重共同控制断裂组合与变形分区(Tapponnier *et al.*, 1990; Yin *et al.*, 2008a, 2008b; Zuza and Yin, 2016).中生代构造层中主要发育平面式或铲式小型正断层组合样式,代表早期拉张环境下典型的半地堑式断陷结构(楼谦谦等,2009; Wu *et al.*, 2011),反映了该时期以伸展构造体制为主的应力环境.相关伸展构造的形成与侏罗-白垩纪时期的区域性盆地扩张密切相关,显示当时研究区处于以NW-SE向伸展为主的动力学环境(周建勋等,2003).

古近纪构造层中发育一系列NW向的逆冲断裂,整体表现为多条倾角中等的逆冲断片沿走向近平行分布,构成区域性的逆冲构造带,指示了以挤压作用为主的构造背景(孙国强等,2012; Wang *et al.*, 2019).该阶段的断裂规模虽较新近纪阶段小,但组合样式具备典型的逆冲构造几何特征,说明古近纪是柴北缘构造演化的重要过渡期(Cheng *et al.*, 2019).因此,该阶段更适合被称为"挤压增强的启动-调整期",其主要意义在于为后续走滑分量叠加与盆地内部构造带前展提供了初始边界条件(Tapponnier *et al.*, 1990; Zuza and Yin, 2016; Cheng *et al.*, 2021).古近纪末期阿尔金断裂活动被认为进入相对活跃阶段(Cowgill *et al.*, 2003, 2004; Gao *et al.*, 2022),可能促使区域边界条件与应力场发生调整,从而为柴北缘逆冲断裂向盆地内部的持续发育与局部构造带的强化提供动力学背景(Cheng *et al.*, 2019).

新近纪至第四纪构造层中构造变形更为复杂,断裂体系呈现逆冲与走滑叠加特征(Jolivet *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2021b),主要表现为两种典型构造样式:其一为北西向的逆冲断层组成的逆冲叠瓦构造,其断层间距较古近纪明显减小,显示构造挤压作用的持续增强;其二为近东西向的呈Y字型组合样式的逆冲走滑断裂,这类断裂往往具有明显的水平错动分量,反映了该时期构造应力场已由挤压向走滑-挤压复合应力体制转变(Zuza and Yin, 2016).这种构造样式的垂向分异特征,为研究区新生代以来构造演化提供了重要的运动学证据,也与数值模拟结果所揭示的印度-欧亚碰撞导致青藏高原多地块差异性缩短和挤压增强的过程一致(Chen *et al.*, 2024).

本区中生代以来的构造演化表现为多阶段应力场的持续调整,中生代伸展作用遗留下的断陷结构与基底非均一性在新生代构造重新组织过程中

具有明显的结构控制作用,对后期断裂分段、褶皱形态及盆地差异化演化产生了重要影响(周建勋等,2003;楼谦谦等,2009;Wu *et al.*, 2011;Gao *et al.*, 2013;李猛等,2018;Li *et al.*, 2021).进入新生代后,早期逆冲推覆活动反映出区域性挤压逐渐增强的趋势,该过程在古近纪至中新世呈现持续累积的特征,构造变形加强具有渐进性而非阶段突变(Jolivet *et al.*, 2001;Yin *et al.*, 2008a, 2008b;Wu *et al.*, 2016;Cheng *et al.*, 2021).古近纪末期阿尔金断裂活动的加剧,使柴达木山抬升加速,并诱发北西-近东西向新生断裂发育,显示当时区域构造动力格局发生了方向性强化与重新分配(Cowgill *et al.*, 2003;Cheng *et al.*, 2019;Gao *et al.*, 2022).在新近纪末,东昆仑逆冲-走滑体系进一步增强了研究区内部褶皱与逆冲变形的强度,而绿梁山的快速隆升对挤压应力起到明显的吸收与屏蔽作用,导致其两侧构造强度出现显著差异(王亮等, 2010;Zuza and Yin, 2016;吴晨等,2023).这类应力传递的不均一性,反映出新生代区域构造应力场存在多阶段叠加与分段响应的特征,与北柴达木盆地新生代构造应力场呈现的规律性增强相一致.总体来看,本区构造格局是中生代伸展构造遗存、新生代挤压增强、走滑构造活动以及局部快速隆升等多种因素共同作用的结果,各构造单元在不同阶段表现出的应变分配与响应差异仍需通过进一步年代学、沉积记录与深部结构成像手段加以更精细的约束(Tapponnier *et al.*, 1990;Wu *et al.*, 2017;Wang *et al.*, 2025).

4.2　构造演化分析

晚三叠世-侏罗纪以来,本区处于一种伸展的构造环境,盆地形成了大量的箕状断陷,与中侏罗-早白垩世伸展型坳陷盆地特征一致(周建勋等,2003;Wu *et al.*, 2011;姚宏鑫等,2017).中生代早期伸展构造环境的形成与阿尔金断裂的走滑作用没有直接的联系,而与其北缘的拉配泉断裂等一系列伸展构造有关,是一次区域性的伸展事件.柴北缘中段在早侏罗世为伸展环境下的断陷盆地,主要表现为一系列小型断陷盆地群;中侏罗世-早白垩世为伸展型坳陷盆地;晚白垩世末盆地受挤压整体隆升,形成广泛不整合(Wu *et al.*, 2011;曹珂, 2013)(图15).

在新生代早期(50～45 Ma),柴北缘断裂开始早期活动,将元古代-早古生代变质岩系逆冲推覆至中新生代地层之上(Jolivet *et al.*, 2001;Yin *et al.*, 2002,2008a).柴北缘中段包括研究区是与柴达木山联通的状态,与大柴旦地区是一个整体,还没有被绿梁山构造带分割.在古近纪时期,柴达木山开始缓慢隆升,地层沉积自西部的盆地向东部山脉逐渐减薄,表现为一个逐渐倾斜抬升的形态.此时区内基本没有强构造活动,不发育大型的断裂和变形,处于构造相对安静的时期.

古近纪末期(27～18 Ma),即本区古近纪末期断层发育时间,柴北缘中段主要受阿尔金断裂活动的影响,柴达木山开始快速隆升,导致绿南断裂开始逆冲推覆走滑活动,同时先存断裂如马仙断裂次级断裂也在持续变形,又产生了许多北西走向和近东西走向的新生断裂(Cowgill *et al.*, 2003;Cheng *et al.*, 2019;Gao *et al.*, 2022).此时,由于绿南断裂系的发育,大柴旦凹陷开始形成,与研究区分异.陵间断裂也在此时开始发育,研究区的整体盆地构造形状形成.

新近系末期(5.1～2.8 Ma),由于东昆仑山的隆升和东昆仑逆冲走滑断裂系的活动,即研究区内第四纪断层发育时期,研究区发生明显的强烈构造变形(图15),内部发育有大量的北西向断裂,褶皱背斜也大量发育,变形程度十分剧烈,变形强度达到最大(Jolivet *et al.*, 2003;Zuza and Yin, 2016;Wu *et al.*, 2021b).而绿梁山隆升速率加快,吸收了大量的挤压变形,东昆仑山隆升所传递的应力被吸收,所以在绿梁山的另一边形成的大柴旦凹陷构造变形较弱,绿梁山两侧的构造单元在断裂组合和变形强度上存在巨大的差异.

以上分析表明,柴北缘地区有多期主要的构造变形过程,多次的构造事件造就了现今的构造形态.而且这种变形是持续发生的,每次变形活动都持续了相当长的一段时间,并非在短时间内完成.但影响后期盆地形态的构造活动主要发生在上新世,柴北缘的主要变形也发生在此时,暗示着青藏高原北缘是在此时开始发生强烈的隆升褶皱变形.平移走滑作用在柴达木盆地北缘广泛发育,同一动力场下的剪切-挤压构造活动强烈,在逆断层和走滑断层的共同控制之下,马海-大红沟地区形成菱格状的隆-凹形态的盆地(Tapponnier *et al.*, 1990;汤良杰等, 2002a;Zuza and Yin, 2016).同时,由于研究区处于柴达木盆地北缘中段,与其具有相似的应力场背景,因此对于柴北缘东段和西段的山前带内陆盆地研究具有指导意义.

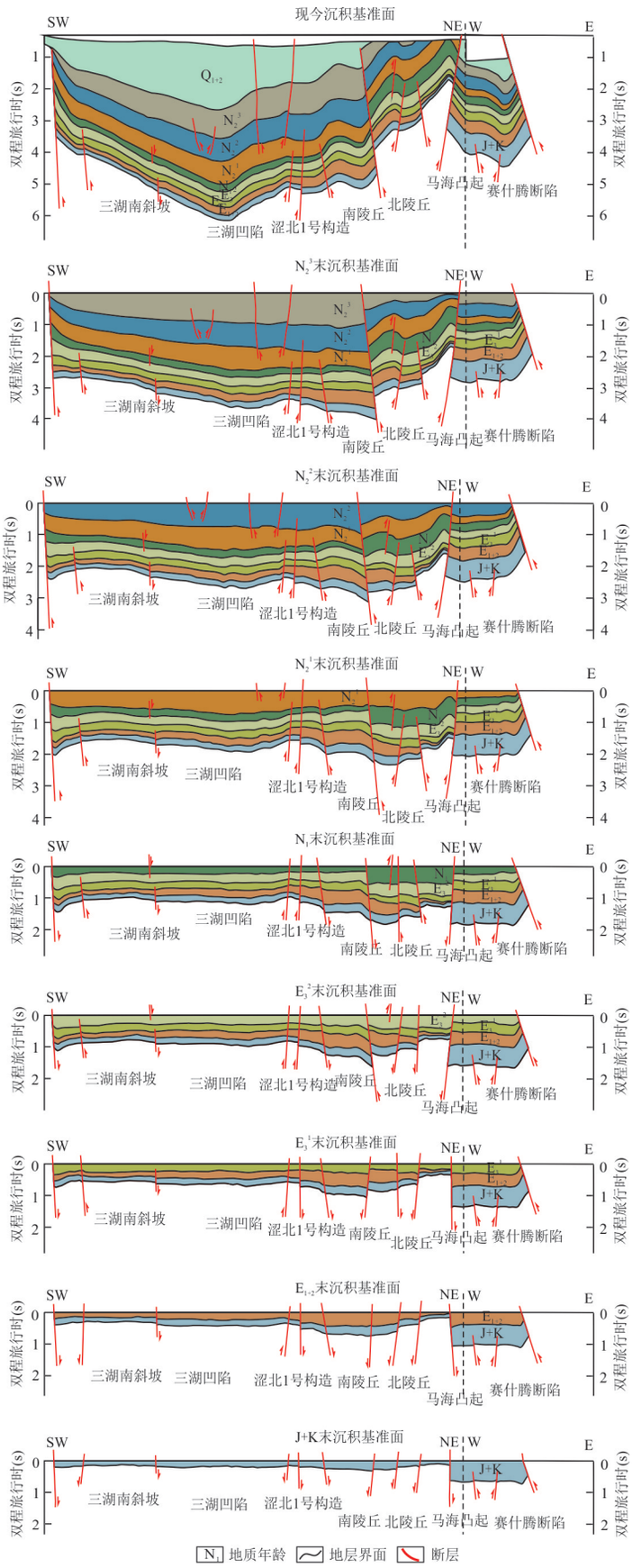


图 15 *HH′*构造演化

Fig.15 Tectonic evolution model along profile *HH′*

5　结论

(1)地层、地震资料和热年代数据表明,研究区在中、新生代至少出现了3次构造运动,可将本区中-新生代构造划分为3个主要构造层,分别是中生代构造层(J+K)、古近纪构造层(E_{1+2}-E_3^2),新近纪至第四纪构造层(N_1-Q).

(2)柴北缘中段的中、新生代构造行迹主要为一系列北西向的断层和褶皱,以逆冲断层为主,部分断裂伴随走滑性质.断裂主要的构造组合样式为古近纪末期呈北西向的逆冲叠瓦状构造;第四纪断层呈一系列北西向的逆冲断层形成的逆冲叠瓦状构造和近东西向的逆冲走滑性质的断裂,第四纪断裂控制着隆-凹构造格局的形成和发育.

(3)区内具有典型的隆起与凹陷相间发育特征,并且与相邻断层的发育性质和特征相匹配,主要的控制因素为走滑断层和逆断层共同作用,使得研究区形成具有独特成因的菱格状隆-凹形态的盆地.

致谢:感谢主编和审稿专家对本文提出的宝贵意见!

References

Cao, K., 2013. Cretaceous Terrestrial Stratigraphic Correlation in China. *Geological Review*, 59(1): 24－40 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. L., Zhu, P. M., Yuan, Y. F., et al., 2024. Formation of the Tibetan Plateau during the India-Eurasia Convergence: Insight from 3-D Multi-Terrane Thermomechanical Modeling. *Journal of Earth Science*, 35(1): 112－130. https://doi.org/10.1007/s12583-023-1931-0

Chen, X. H., Wang, Z. H., Yang, N., et al., 2010.Geological Characteristics of and Metallogenic Model for Large-Scale Sayak Copper Ore Field in Balkhash Metallogenic Belt, Central Asia. *Journal of Geomechanics*, 16(2): 189－202 (in Chinese with English abstract).

Cheng, F., Garzione, C.N., Jolivet, M., et al., 2019. Initial Deformation of the Northern Tibetan Plateau: Insights from Deposition of the Lulehe Formation in the Qaidam Basin. *Tectonics*, 38(2): 741－766. https://doi. org/10.1029/2018TC005214

Cheng, F., Jolivet, M., Guo, Z. J., et al., 2021. Cenozoic Evolution of the Qaidam Basin and Implications for the Growth of the Northern Tibetan Plateau: A Review. *Earth-Science Reviews*, 220: 103730. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103730

Cheng, F., Jolivet, M., Hallot, E., et al., 2017. Tectono-Magmatic Rejuvenation of the Qaidam Craton, Northern Tibet. *Gondwana Research*, 49: 248－263.https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.06.004

Cowgill, E., Yin, A., Arrowsmith, J.R., et al., 2004. The Akato Tagh Bend along the Altyn Tagh Fault, Northwest Tibet 1: Smoothing by Vertical-Axis Rotation and the Effect of Topographic Stresses on Bend-Flanking Faults. *Geological Society of America Bulletin*, 116(11－12): 1423－1442.https://doi.org/10.1130/B25359.1

Cowgill, E., Yin, A., Feng, W.X., et al., 2000. Is the North Altyn Fault Part of a Strike-Slip Duplex along the Altyn Tagh Fault System? *Geology*, 28(3): 255－258. https://doi. org/10.1130/0091-7613(2000)28<255:ITNAFP>2.0.CO;2

Cowgill, E., Yin, A., Harrison, T.M., et al., 2003. Reconstruction of the Altyn Tagh Fault Based on U-Pb Geochronology: Role of Back Thrusts, Mantle Sutures, and Heterogeneous Crustal Strength in Forming the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B7): 2002JB002080. https://doi.org/10.1029/2002JB002080

Gao, R., Wang, H.Y., Yin, A., et al., 2013. Tectonic Development of the Northeastern Tibetan Plateau as Constrained by High-Resolution Deep Seismic-Reflection Data. *Lithosphere*, 5(6): 555－574. https://doi. org/10.1130/L293.1

Gao, S.B., Cowgill, E., Wu, L., et al., 2022. From Left Slip to Transpression: Cenozoic Tectonic Evolution of the North Altyn Fault, NW Margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 41(3): e2021TC006962. https://doi.org/10.1029/2021TC006962

Gehrels, G.E., Yin, A., Wang X.F., 2003. Magmatic History of the Northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9): 1－14. https://doi.org/10.1029/2002JB001876

Guan, S. W., Wu, L., Ren, R., et al., 2017. Distribution and Petroleum Prospect of Precambrian Rifts in the Main Cratons, China. *Acta Petrolei Sinica*, 38(1): 9－22 (in Chinese with English abstract).

Guan, S. W., Zhang, S. C., Zhang, Y. S., et al., 2017. Boundary Effect and Hydrocarbon Accumulation Pattern of Paleogene Hydrocarbon Generation Depression in the Western Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 38(11): 1217－1229 (in Chinese with English abstract).

Guan, T., Wu, L., Yang, B., et al., 2025. Influence of Pre-Existing Strength Discontinuities on Cenozoic Evolution of the Altyn Tagh Fault System, Northern Tibetan Plateau: Insights from Physical Analog Modeling. *Tecton-*

ics, 44(8): e2024TC008715. https://doi.org/10.1029/2024TC008715

Hou, Y.F., Song, B.W., Li, X.C., et al., 2024. First Record of Cyclocarya from the Early Oligocene Qaidam Basin, North Tibet: Implications for the Paleogeography and Paleoecology. *Journal of Earth Science*, 35(1): 201－211. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1580-2

Huang, H.C., Huang, Q. H., Ma, Y.S., 1996. Geology of Qaidam Basin and Its Petroleum Prediction: Three-Dimensional Geology, Three-Dimensional Stress and Hydrocarbon Accumulation Model. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Jolivet, M., Brunel, M., Seward, D. et al., 2001. Mesozoic and Cenozoic Tectonics of the Northern Edge of the Tibetan Plateau: Fission-Track Constraints. *Tectonophysics*, 343(1－2): 111－134. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00196-2

Jolivet, M., Brunel, M., Seward, D., et al., 2003. Neogene Extension and Volcanism in the Kunlun Fault Zone, Northern Tibet: New Constraints on the Age of the Kunlun Fault. *Tectonics*, 22(5): 2002TC001428. https://doi.org/10.1029/2002TC001428

Li, B., Qi, B.S., Chen, X.H., et al., 2024a. Two-Phase Kinematic Evolution of the Qilian Shan, Northern Tibetan Plateau: Initial Eocene-Oligocene Deformation That Accelerated in the Mid-Miocene. *Geological Society of America Bulletin*, 136(5－6): 2389－2406. https://doi.org/10.1130/B37159.1

Li, J., Wu, C., Li, X.G., et al., 2024b. Tectonic Inversion of an Intracontinental Rift Basin: An Example from the Opening and Closure of the Paleo-Tethys Ocean, Northern Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 136(11－12): 5145－5173. https://doi.org/10.1130/b37605.1

Li, B., Wang, Y.C., Zuza, A.V., et al., 2023. Cenozoic Deformation in the Eastern Domain of the North Qaidam Thrust Belt, Northern Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 135(1－2): 331－350. https://doi.org/10.1130/B36215.1

Li, B., Zuza, A.V., Wang, Y.C., et al., 2021. Cenozoic Tectonic Development of Northern Tibetan Plateau: Insights from Structural Analysis along the North Qaidam Thrust Belt. *Geological Society of America Bulletin*, 133(7－8): 1432－1450.

Li, C.Y., Wang, Q., Zhang, Z.M., et al., 1980. A Preliminary Study of Plate Tectonics of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2(1): 11－22 (in Chinese).

Li, M., Wang, C., Li, R.S., et al., 2018. Detrital Zircon Geochronology and Geological Significance of Zhoujieshan Formation, Quanji Group in North Margin of Qaidam Basin. *Earth Science*, 43(12): 4390－4398 (in Chinese with English abstract).

Liu, K., Wang, W.T., Jin, R.Z., et al. 2024. Exhumation of the Qilian Shan and Miocene Activity of the Haiyuan Fault: Insights from Apatite (U-Th)/He Thermochronology in the Laolongwan Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Journal of the Geological Society*, 181(3): jgs2023－jgs2111. https://doi.org/10.1144/jgs2023-111

Lou, Q.Q., Xiao, A.C., Yang, H., et al., 2009. Characteristics of Mesozoic Basin of the Northern Qaidam: A Case Study on Dachaidan Depression. *Geological Journal of China Universities*, 15(3): 407－416 (in Chinese with English abstract).

Meng, W.B., Li, M., Liu, J.D., et al., 2010. Terminal Fan Sedimentary System of Lulehe Formation in Qianxi Area in Northern Margin of Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 22(4): 37－42 (in Chinese with English abstract).

Peng, Y.H., Li, D.Q., 2015. Study on Electric Structure in a Hydrocarbon Accumulation Area, Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 27(1): 115－121 (in Chinese with English abstract).

Sang, S.P., Lu, H.J., Ye, J.C., et al., 2024. Sediment Recycling in the Northern Qaidam Basin Margin during the Cenozoic: A Case Study from the Dahonggou Section. *Geology in China*, 51(2): 606－622 (in Chinese with English abstract).

Sun, G.Q., Si, D., Wang, M., et al., 2012. The Tectonic Kinematic Process and the Types of Oil and Gas Reservoirs in Northern Margin of Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 23(5): 826－832 (in Chinese with English abstract).

Tang, L.J., Jin, Z.J., Dai, J.S., et al., 2002a. Regional Fault Systems of Qaidam Basin and Adjacent Orogenic Belts. *Earth Science*, 27(6): 676－682 (in Chinese with English abstract).

Tang, L.J., Jin, Z.J., Qi, J.F., et al., 2002b. Main Progress and Prospects of the Structural Analysis of Petroliferous Basins in China. *Geological Review*, 48(2): 182－192 (in Chinese with English abstract).

Tao, N., Jiao, R.H., Liu, Y.D., et al., 2025. Thermotectonic History of the Longshou Shan: From Paleozoic Tethys Subduction to Cenozoic Tibetan Plateau Growth. *Tectonophysics*, 895: 230560. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230560

Tapponnier, P., Lacassin, R., Leloup, P.H., et al., 1990.

The Ailao Shan/Red River Metamorphic Belt: Tertiary Left-Lateral Shear between Indochina and South China. *Nature*, 343(6257): 431－437. https://doi.org/10.1038/343431a0

Tapponnier, P., Xu, Z. Q., Roger, F., et al., 2001.Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau.*Science*, 294(5547): 1671－1677. https://doi. org/10.1126/science.105978

Wang, G. H., Ran, S. M., Li, M., 2001.The Characteristics of Neogene Sertengshan - Xietieshan Oblique Thrust Fault in the Northern Margin of Qaidam Basin. *Journal of Geomechanics*, 7(3): 224－230 (in Chinese with English abstract).

Wang, L., Zhang, Y.S., Xiao, A.C., et al., 2010. Structural Characteristics and Activity Analysis of the Maxian Fault in the Northern Margin of the Qaidam Basin. *Chinese Journal of Geology* (*Geological Science*), 45 (3): 589－602 (in Chinese with English abstract).

Wang, W. T., Zhang, P. Z., Duan, L., et al., 2022.Cenozoic Stratigraphic Chronology and Sedimentary - Tectonic Evolution of the Qaidam Basin. *Chinese Science Bulletin*, 67(28): 3452－3475 (in Chinese).

Wang, X. X., Zattin, M., Yang, Y., et al., 2024.Multiple Exhumation Stages during the Cenozoic Evolution of the Northeast Tibetan Plateau.*Tectonics*, 43(3): e2023TC007850. https://doi.org/10.1029/2023TC007850

Wang, X.L, Yuan, W.M., Hu, Z.Q., et al., 2025.Evidence from Zircon and Apatite Thermochronology Provides Evidence for the Tectonic-Thermal Evolution and Denudational Processes in Dulan, Eastern Kunlun Mountains, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 278: 106417. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2024.106417

Wang, Y. B., Zhang, Y. S., Xiao, A. C., et al., 2019. Structural Coupling of Deep and Shallow Fault Systems in the Nanbaxian Anticline, Northern Qaidam Basin. *Geological Journal of China Universities*, 25(5): 741－747 (in Chinese with English abstract).

Wu, C., Chen, X. H., Ding, L., 2023. Tectonic Evolution and Cenozoic Deformation History of the Qilian Orogen. *Earth Science Frontiers*, 30(3): 262－281 (in Chinese with English abstract).

Wu, C., Li, J., Ding, L., 2021a. Low-Temperature Thermochronology Constraints on the Evolution of the Eastern Kunlun Range, Northern Tibetan Plateau. *Geosphere*, 17(4): 1193－1213. https://doi. org/10.1130/GES02358.1

Wu, C., Zuza, A.V., Li, J. et al., 2021b. Late Mesozoic-Cenozoic Cooling History of the Northeastern Tibetan Plateau and Its Foreland Derived from Low-Temperature Thermochronology. *Geological Society of America Bulletin*, 133(11－12): 2393－2417. https://doi. org/10.1130/B35879.1

Wu, C., Yin, A., Zuza, A.V. et al., 2016. Pre-Cenozoic Geologic History of the Central and Northern Tibetan Plateau and the Role of Wilson Cycles in Constructing the Tethyan Orogenic System. *Lithosphere*, 8(3): 254－292.https://doi.org/10.1130/L494.1

Wu, C., Zuza, A.V., Yin, A. et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Neoproterozoic Granitoids in the Central Qilian Shan of Northern Tibet: Reconstructing the Amalgamation Processes and Tectonic History of Asia. *Lithosphere*, 9(4): 609－636. https://doi. org/10.1130/L640.1

Wu, C., Zuza, A. V., Zhou, Z. G., et al., 2019. Mesozoic-Cenozoic Evolution of the Eastern Kunlun Range, Central Tibet, and Implications for Basin Evolution during the Indo-Asian Collision.*Lithosphere*, 11(4): 524－550. https://doi.org/10.1130/L1065.1

Wu, L., Xiao, A. C., Wang, L. Q., et al., 2011. Late Jurassic-Early Cretaceous Northern Qaidam Basin, NW China: Implications for the Earliest Cretaceous Intracontinental Tectonism. *Cretaceous Research*, 32(4): 552－564. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2011.04.002

Wu, Y. X., Yang, X. J., Xue, J. Q., et al., 2017. Analysis on Main Factors Controlling Tight Oil Accumulation in Zhahaquan Area, Western Qaidam Basin.*Special Oil & Gas Reservoirs*, 24(3): 21－25 (in Chinese with English abstract).

Xu, M. Q., Zheng, W. J., Duan, L., et al., 2024. Magnetic Fabric Characteristic of Cenozoic Sediments from Lulehe Section in the Northern Qaidam Basin, China and Its Tectonic Implications.*Journal of Earth Sciences and Environment*, 46(3): 364－383 (in Chinese with English abstract).

Yang, F., Zou, N. N., Shi, J. A., et al., 2013. Probability Cumulative Grain Size Curves in the Paleogene Clastic Sediments and Environmental Significance in Maxian Region of Northern Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(4): 690－700 (in Chinese with English abstract).

Yang, H. T., Tan, W., Wu, L., et al., 2024. Impact of Multiple Weak Layers on Deformation of the Interior of Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau.*Geological Society of America Bulletin*, 136(9－10): 4364－4380. https://doi.org/10.1130/B37299.1

Yao, H. X., Wang, Z. X., Zhu, S. Z., et al., 2017. The Jurassic Fossil-Rich Clastic Sequence and Structural Re-

sponse in North of Qaidam Basin. *Northwestern Geology*, 50(2): 16－27 (in Chinese with English abstract).

Yin, A., 2000. Mode of Cenozoic East-West Extension in Tibet Suggesting a Common Origin of Rifts in Asia during the Indo-Asian Collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21745－21759. https://doi.org/10.1029/2000JB900168

Yin, A., Dang, Y.Q., Wang, L.C., et al., 2008a. Cenozoic Tectonic Evolution of Qaidam Basin and Its Surrounding Regions (Part 1): The Southern Qilian Shan-Nan Shan Thrust Belt and Northern Qaidam Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7－8): 813－846. https://doi.org/10.1130/B26180.1

Yin, A., Dang, Y.Q., Zhang, M., et al., 2008b. Cenozoic Tectonic Evolution of the Qaidam Basin and Its Surrounding Regions (Part 3): Structural Geology, Sedimentation, and Regional Tectonic Reconstruction. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7－8): 847－876. https://doi.org/10.1130/B26232.1

Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211－280. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211

Yin, A., Rumelhart, P.E., Butler, R., et al., 2002. Tectonic History of the Altyn Tagh Fault System in Northern Tibet Inferred from Cenozoic Sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257－1295. https://doi. org/10.1130/00167606(2002)114<1257:THOTAT>2.0.CO;2

Yu, X.J, Guo, Z.J., Du, W., et al. 2025. Differential Tectonic Activity along the Southern Boundary of the Qilian Mountains: Insights from Low-Temperature Thermochronology, Seismic Data, and Fluvial Geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 137(5－6): 2016－2034.https://doi.org/10.1130/B37917.1

Yuan, S. H., Liu, Y. J., Ge, X. H., et al., 2008. Uplift Period of the Northern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Evidences from the Altyn Mountains and Qaidam Basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 413－421 (in Chinese with English abstract).

Zeng, D., Ding, L., Spicer, R. A., et al., 2025.Direct Dating of Qaidam Basin Stratigraphy, Northern Tibet.*Earth and Planetary Science Letters*, 664: 119440. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119440

Zeng, L. B., Jin, Z. J., Li, J. C., et al., 2001. Fractal Characteristics of Fractural Structures and Its Relation to Oil-Gas Distribution in North Qaidam Basin.*Chinese Journal of Geology*, 36(2): 241－247 (in Chinese with English abstract).

Zhai, G. M., 2002. On Prospective Hydrocarbon Resources of China in 21st Century. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(4): 271－278 (in Chinese with English abstract).

Zhou, J. X., Xu, F. Y., Hu, Y., 2003. Mesozoic and Cenozoic Tectonism and Its Control on Hydrocarbon Accumulation in the Northern Qaidam Basin of China. *Acta Petrolei Sinica*, 24(1): 19－24 (in Chinese with English abstract).

Zuza, A.V., Yin, A., 2016. Continental Deformation Accommodated by Non-Rigid Passive Bookshelf Faulting: An Example from the Cenozoic Tectonic Development of Northern Tibet. *Tectonophysics*, 677: 227－240. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.007

中文参考文献

曹珂, 2013. 中国陆相白垩系地层对比. 地质论评, 59(1): 24－40.

陈宣华, 王志宏, 杨农, 等, 2010. 中亚巴尔喀什成矿带萨亚克大型铜矿田矿床地质特征与成矿模式. 地质力学学报, 16(2):189－202.

管树巍, 吴林, 任荣, 等, 2017a. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景. 石油学报, 38(1): 9－22.

管树巍, 张水昌, 张永庶, 等, 2017b. 柴达木盆地西部古近系生烃凹陷的边界效应与油气聚集模式. 石油学报, 38(11):1217－1229.

黄汉纯, 黄庆华, 马寅生, 1996. 柴达木盆地地质与油气预测——立体地质·三维应力·聚油模式. 北京: 地质出版社.

李春昱, 王荃, 张之孟, 等, 1980. 中国板块构造的轮廓. 地球学报, 2(1): 11－22.

李猛, 王超, 李荣社, 等, 2018. 柴达木盆地北缘全吉群皱节山组碎屑锆石年代学特征及其地质意义. 地球科学, 43(12): 4390－4398.

楼谦谦, 肖安成, 杨浩, 等, 2009. 柴达木盆地北缘中生代盆地性质研究——对大柴旦凹陷的解剖. 高校地质学报, 15(3): 407－416.

孟万斌, 李敏, 刘家铎, 等, 2010. 柴达木盆地北缘潜西地区路乐河组末端扇沉积体系分析. 岩性油气藏, 22(4): 37－42.

彭勇辉, 李帝铨, 2015. 柴达木盆地某油气聚集区电性结构研究. 岩性油气藏, 27(1): 115－121.

桑胜萍, 卢海建, 叶家灿, 等, 2024. 柴达木盆地北缘新生代沉积物再旋回作用研究: 以大红沟剖面为例. 中国地质, 51(2): 606－622.

孙国强, 司丹, 王牧, 等, 2012. 柴达木盆地北缘地区构造运动过程及油气藏类型. 天然气地球科学, 23(5): 826－832.

汤良杰, 金之钧, 戴俊生,等,2002a. 柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统. 地球科学, 27(6): 676－682.

汤良杰, 金之钧, 漆家福,等,2002b. 中国含油气盆地构造分析主要进展与展望. 地质论评, 48(2): 182－192.

王根厚, 冉书明, 李明, 2001. 柴达木盆地北缘赛什腾-锡铁山左行逆冲断裂及地质意义. 地质力学学报, 7(3): 224－230.

王亮, 张永庶, 肖安成, 等, 2010. 柴达木盆地北缘马仙断裂构造特征及其活动性分析. 地质科学, 45(3): 589－602.

王伟涛, 张培震, 段磊, 等, 2022. 柴达木盆地新生代地层年代框架与沉积-构造演化. 科学通报, 67(28): 3452－3475.

王彦博, 张永庶, 肖安成, 等, 2019. 柴达木盆地北缘南八仙背斜深、浅断裂系统耦合分析. 高校地质学报, 25(5): 741－747.

吴晨, 陈宣华, 丁林, 2023. 祁连造山带构造演化与新生代变形历史. 地学前缘, 30(3): 262－281.

吴颜雄, 杨晓菁, 薛建勤, 等, 2017. 柴西地区扎哈泉致密油成藏主控因素分析. 特种油气藏, 24(3): 21－25.

许梦强, 郑文俊, 段磊, 等, 2024. 柴达木盆地北缘路乐河新生代地层剖面磁组构特征及其构造意义. 地球科学与环境学报, 46(3):364－383.

杨飞,邹妞妞,史基安,等,2013. 柴达木盆地北缘马仙地区古近系碎屑岩沉积环境粒度概率累积曲线特征. 天然气地球科学, 24(4): 690－700.

姚宏鑫, 王宗秀, 朱随洲,等,2017. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积层序的构造演化响应. 西北地质, 50(2): 16－27.

袁四化, 刘永江, 葛肖虹, 等, 2008. 青藏高原北缘的隆升时期——来自阿尔金山和柴达木盆地的证据. 岩石矿物学杂志,27(5): 413－421.

曾联波, 金之钧, 李京昌,等,2001. 柴达木盆地北缘断裂构造分形特征与油气分布关系研究. 地质科学, 36(2): 241－247.

翟光明, 2002.21世纪中国油气资源远景. 新疆石油地质, 23(4): 271－278.

周建勋, 徐凤银, 胡勇, 2003. 柴达木盆地北缘中、新生代构造变形及其对油气成藏的控制. 石油学报, 24(1): 19－24.