

准噶尔盆地中央坳陷东部晚古生代—中生代 构造演化及盆山耦合过程^{*}

陈贺贺^{1,2,3} 李攀⁴ 马强⁵ 杨帆⁴ 徐杰^{1,2,3}
温九存⁶ 刘长鹏¹ 陈柯帆¹

1 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

2 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083

3 中国地质大学(北京)海南研究院, 海南三亚 572000

4 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

5 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

6 中国石化胜利油田, 山东东营 257000

摘 要 响应于晚古生代—中生代准噶尔盆地洋盆俯冲—弧陆/陆陆碰撞的过程, 盆地次级构造单元发育复杂的伸展—压陷响应, 这一盆山耦合过程对区域油气资源勘探具有重要意义。基于准噶尔盆地中央坳陷东部 15 口钻井合成地震记录分析及 8 条盆地格架地震剖面的综合解释厘清了关键构造界面, 通过构造平衡剖面恢复系统研究了中央坳陷东部石炭纪以来的盆山耦合机制及古地理格局变迁。结果表明: (1) 中央坳陷东部地区自石炭纪以来东西方向构造活动可划分为“拉张期—挤压一期—过渡期—挤压二期—过渡期”等 5 期, 东西向挤压从盆地南部开始, 北部挤压起始时间滞后, 盆地不同部位构造活动持续时间和强度不同, 表现为盆地南部挤压强度大于北部, 中部挤压作用相对最强; (2) 中央坳陷东部地区南北方向构造演化期次与东西向一致, 南北向挤压从东部开始, 逐步扩展至西部, 其中盆地西部 2 期挤压持续时间大致相同, 中部挤压二期规模大于挤压一期, 空间上挤压由北向南发展, 挤压一期以克拉美丽山受挤压隆升为主, 挤压二期以博格达山受挤压隆升为主; (3) 中央坳陷东部地区东西向 2 期挤压作用的发育相对早于南北向, 持续周期较短, 而南北向挤压开始晚, 持续时间长, 因此盆地南北向构造凸起发育应当略早于东西向构造凸起, 盆地先发育东西向分隔, 进而发育南北向分隔, 其中北三台凸起发育最早, 为拉张期形成的断隆结构, 挤压二期阶段反转为逆冲推覆隆起, 白家海与莫索湾凸起仅发育于挤压一期, 而沙奇凸起隆起较晚, 发育于挤压二期。受上述盆山耦合过程控制, 准噶尔盆地中央坳陷东部地区有利油气勘探区域为白家海凸起与阜康凹陷南斜坡等构造—岩性复合圈闭发育区, 以中二叠统为最有利主力勘探层系。

关键词 准噶尔盆地 北三台凸起 沙奇凸起 芦草沟组 构造演化 盆山耦合

第一作者简介 陈贺贺, 男, 1989 年生, 副教授, 主要从事构造—沉积学、沉积动力学与源—汇系统等方面的教学和科学研究工作。E-mail: hehechen@cugb.edu.cn。

中图分类号: P618.130.2 **文献标志码:** A

^{*} 国家自然科学基金项目(编号: 42306083), 中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号: 2023ZZ24YJ01), 中央基本科研业务费项目(编号: 3-7-9-2024-06), 高等学校学科创新引智计划(111 计划)项目(编号: B20011), 中国地质大学(北京)海南研究院资助项目(编号: HNPY-202419)共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42306083), the PetroChina Science and Technology Project (No. 2023ZZ24YJ01), the Central Universities Basic Research Operating Expenses Project (No. 3-7-9-2024-06), the High-level University Discipline Innovation and Intelligence Introduction Program (111 Program) (No. B20011), and the Hainan Research Institute of China University of Geosciences (Beijing) (No. HNPY-202419)]

收稿日期: 2026-02-24 改回日期: 2026-05-14

Regional tectonic evolution and basin-mountain coupling process in eastern Central Depression of Junggar Basin during the Late Paleozoic to Mesozoic

CHEN Hehe^{1,2,3} LI Pan⁴ MA Qiang⁵ YANG Fan⁴ XU Jie^{1,2,3}

WEN Jiucun⁶ LIU Changpeng¹ CHEN Kefan¹

¹ School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

² Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

³ Hainan Institute of China University of Geosciences (Beijing), Hainan Sanya 572000, China

⁴ Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

⁵ Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Tuha Oilfield Company, PetroChina, Xinjiang Hami 839009, China

⁶ Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Shandong Dongying 257000, China

Abstract In response to the Paleozoic subduction-arc-continent and continent-continent collision process in Junggar Basin, the secondary tectonic units of the basin have developed complex extensional-sag responses. Among them, the Paleozoic-Mesozoic basin-mountain coupling process in the eastern part of Central Depression of Junggar Basin is of great significance for regional oil and gas resource exploration. Based on the analysis of synthetic seismic records from 15 drilling wells and the comprehensive interpretation of eight basin framework seismic profiles, this paper clarifies the key structural surfaces, and through the restoration of structural balance profiles, systematically studies the basin-mountain coupling mechanism and palaeogeographic pattern changes since the Carboniferous in the eastern part of Central Depression of the Junggar Basin. The results show: (1) East-west-oriented tectonic activity since the Carboniferous can be subdivided into five evolutionary stages: rifting → compression I → transition period → compression II → transition. East-west compression initiated in the southern part of the basin, with a progressively delayed onset in northern sectors. Both the duration and intensity of deformation vary spatially: compressional strain is strongest in the central basin, moderate in the south, and weakest in the north; (2) North-south-oriented tectonic evolution of the eastern Central Depression is consistent with the east-west direction, with north-south compression originated in the eastern part and gradually migrated westward. Among them, the two compressional phases exhibit comparable durations, and compression II exceeds compression I in magnitude. Spatially, the compression propagated from north to south: compression I was dominated by foreland sag development ahead of the Kelameili Mountains, whereas compression II was characterized by foreland sag formation ahead of the Bogda Mountains; (3) The two east-west compression phases in the eastern area of Junggar Basin developed earlier than the north-south compression, but are shorter in duration; conversely, north-south compression commenced later yet persisted longer. Therefore, the development of the north-south tectonic uplifts in the basin initiated slightly earlier than their east-west tectonic uplifts, indicating an initial phase of east-west lithospheric separation followed by subsequent north-south separation. Among them, the Beisantai uplift formed earliest, initiating as a fault-bounded rift-related structure during the rifting stage and later reactivating as a thrust-related orogenic uplift during compression II. The Baijiahai and Mosuowan uplifts developed exclusively during compression I, whereas the Shaqi uplift emerged later during compression II. Under the control of the above basin-mountain coupling framework, the favorable oil and gas exploration areas are located on the Baijiahai uplift and the southern slope of the Fukang sag, etc., where structural-

stratigraphic composite traps are developed, with the Middle Permian being the most favorable main exploration formation.

Key words Junggar Basin, Beisantai uplift, Shaqi uplift, Lucaogou Formation, tectonic evolution, basin-mountain coupling

About the first author CHEN Hehe, born in 1989, an associate professor, is engaged in teaching and researches on tectoni-sedimentology geology, sedimentary dynamics, and source-to-sink systems. E-mail: hehechen@cugb.edu.cn.

0 引言

构造地质学与沉积学是含油气盆地资源勘探中最重要的支柱型学科,然而长久以来,基于野外露头、钻井岩心等尺度的沉积学相关研究,往往难以完成盆地内从“点”到“面”的尺度升级研究,面临着沉积学与构造地质学认识相“脱节”的境遇。二维及三维地震资料的广泛应用,为构造-沉积学综合研究的应用奠定了重要的基础(曾允孚和覃建雄, 1999; Crook, 2000; Gawthorpe and Leeder, 2000)。构造-沉积学交叉研究意在揭示地球表层系统中构造演化与沉积响应的动态耦合关系,为理解盆山耦合过程、含油气盆地资源勘探与灾害防控提供关键理论支撑(曾允孚和覃建雄, 1999; 舒良树等, 2004; 刘池洋等, 2005)。准噶尔盆地是中国西北地区重要的油气生产基地,为历经多期构造演化、沉积充填复杂的大型叠合含油气盆地(Carroll *et al.*, 1990; 何登发等, 2004; 方世虎等, 2006; 张元元等, 2021; 甄宇等, 2024)。该盆地油气勘探呈现显著的区域不平衡性,其中西部拗陷研究程度高、勘探成果丰富,而东部地区受地质条件复杂影响,勘探多集中于浅层局部区域,深层及隐蔽油气藏勘探近乎空白,亟待开展构造-沉积学综合研究(李涤, 2016; Li *et al.*, 2016; 唐勇等, 2022a, 2022b)。

准噶尔盆地内部次级凹陷的构造-沉积演化与盆山耦合过程一直是地质学界研究的热点(Carroll *et al.*, 1990; 蔡忠贤等, 2000; 张朝军等, 2006; 殷树铮等, 2024)。近年来,随着油气勘探向深层拓展,阜康凹陷及邻区的古生界深层中发现了多套含油气组合,但关于该区域盆山耦合的时空规律、古地理格局动态变迁及断裂对油气运移的控制作用仍存在争议(张奎华等, 2020; 殷树铮等, 2024)。阜康凹陷作为准噶尔盆地东部重要构造单元,二叠纪处于天山造山带北缘构造活动强烈期,但盆地的构

造属性(伸展/前陆/走滑)长期存在争议,存在着裂陷后伸展拗陷型盆地(陈发景等, 2005; Tang *et al.*, 2015)与俯冲前陆盆地(陈业全, 2004; 于福生等, 2009) 2 种观点,制约了盆地构造演化对沉积体系控制机制的剖析。此外,现今的大部分中央拗陷东部地区盆山耦合研究多聚焦于克拉美丽山、博格达山、北天山的推覆演化与阜康凹陷及吐哈盆地的发育过程(Li *et al.*, 2016; 王家林等, 2016; 史燕青, 2020; Zhao *et al.*, 2020; 唐勇等, 2022a, 2022b; 殷树铮等, 2024),较少关注准噶尔盆地盆内次级构造单元的盆山耦合响应,对中央拗陷东部地区油气勘探的直接指示有限。

本研究基于大量地震剖面解释、钻井资料分析及构造平衡剖面恢复,重点厘清中央拗陷东部地区石炭纪以来构造演化过程,分别从东西、南北 2 个方向分析盆地不同部位的构造类型及活动强度的时空差异,并在克拉美丽山与博格达山南北向物源体系转换的区域背景下,深入分析前陆盆地早期裂陷格局及后期构造反转对盆内物源体系发育的影响。该研究揭示了构造演化过程对盆山耦合过程的控制作用,以及盆外、盆内物源体系演化下古地理格局的演化,不仅有助于重建准噶尔盆地中央拗陷东部地区关键地质时期的古地理面貌,为油气资源勘探提供直接的理论支撑,而且可对低勘探区(2D 测线为主的勘探区域)多期叠合型盆地勘探提供示例。

1 区域地质背景

准噶尔盆地中央拗陷东部地区北起克拉美丽山,南至博格达山北麓,西抵白家海凸起,东接吉木萨尔凹陷,面积约 9000 km² (图 1)。构造单元划分上处于多构造体系交汇部位,构造演化受南部博格达山及北部克拉美丽山系隆升与盆内凸起的耦合作用控制(蔡忠贤等, 2000; 张朝军等, 2006) (图 1)。

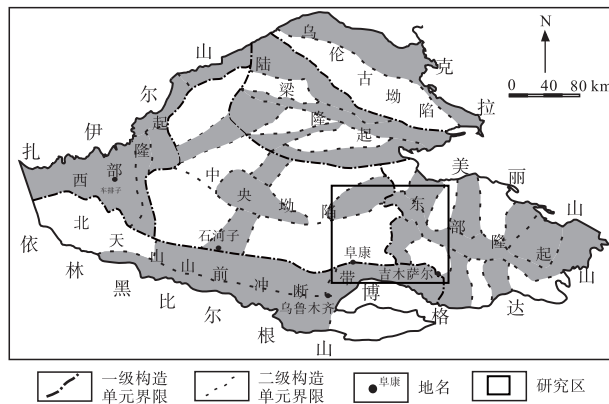


图 1 准噶尔盆地构造单元区划

Fig. 1 Tectonic units zoning map of Junggar Basin

准噶尔盆地中央坳陷东部是盆山耦合作用的关键过渡单元，具有多期挤压改造、阶段性差异隆升、继承性变形与分区差异演化的总体特征。受古亚洲洋构造域与特提斯洋构造域挤压应力的远场构造效应影响，克拉美丽山与博格达山发生多期隆升，主导并塑造了盆山耦合过程，形成了“下伸展、上挤压”的双层构造结构（方世虎等，2006；马超等，2019；殷树铮等，2024；甄宇等，2024），控制着中央坳陷东部地区的沉积充填与构造演化（陈发景等，2005；方世虎等，2006；Tang *et al.*, 2015；易泽军等，2018）。其中，海西构造期，区域整体处于挤压汇聚背景，盆地内部以整体坳陷沉降、凹凸构造格局雏形发育为特征，构造变形相对平缓；克拉美丽山长期维持古隆起属性，构造活动微弱，以稳定抬升与风化剥蚀为主；博格达山残余海槽逐步闭合，发生初始挤压隆升，构造挤压与褶皱活化作用更强，成为区域南部重要物源供给区（张朝军等，2006；易泽军等，2018；张磊等，2020；殷树铮等，2024）。燕山构造期，区域挤压改造作用加剧。盆内构造分异显著增强，周缘凸起间歇性抬升剥蚀，凹陷持续沉降，断裂与宽缓褶皱广泛发育；克拉美丽山保持低幅度隆起状态，构造变形微弱，以长期稳态剥蚀为主；博格达山进入强烈挤压造山阶段，受南北向挤压影响，褶皱冲断构造大规模发育，以“自东向西渐进增强”为典型特征强烈逆冲隆升，是该期变形最强烈的构造单元（张朝军等，2006；易泽军等，2018；张磊等，2020；殷树铮等，2024）。喜马拉雅构造期，研究区进入陆内改造定型阶段。盆地内部整体发生区域性南倾掀斜，构造活动微弱，无强烈褶皱和断裂改

造，以稳定沉降为主要特征；克拉美丽山构造状态稳定，基本无新生变形；博格达山受新生代远程挤压作用影响，发生强烈陆内逆冲造山，边界断裂持续活化、快速隆升，奠定研究区现今南北分异的盆山构造格局（张朝军等，2006；易泽军等，2018；张磊等，2020；殷树铮等，2024）。综上所述，克拉美丽山整体上以长期稳定隆起、弱变形为主，盆地内部以差异沉降、弱—中等挤压改造为特征，而博格达山经历多期递进式挤压隆升，构造活动持续且改造强度最大，是控制研究区构造演化与分区变形的核心造山单元。

受控于上述盆山耦合过程，研究区自下而上依次发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及古近系—第四系（图 2；图 3）。其中，石炭纪盆地整体处于拉张—挤压过渡阶段，发育多期小型盆地，至晚石炭世海水退出，盆地整体转为海陆交互—陆相环境（蔡忠贤等，2000；张朝军等，2006；甄宇等，2024）。早二叠世中央坳陷东部地区全面隆升，盆地内部呈现“坳隆相间”的构造格局，石炭系基底抬升遭受风化剥蚀，与上覆芦草沟组形成了角度不整合；中二叠世早期，区域应力场由挤压转为伸展，中央坳陷东部地区成为独立的构造单元；至中—晚二叠世，受塔里木—准噶尔板块碰撞影响，区域再次受到挤压，北三台凸起隆升，芦草沟组顶界遭受剥蚀，与上覆中二叠统上乌尔禾组形成不整合（殷树铮等，2024；甄宇等，2024）（图 2；图 3）。晚二叠世与三叠纪的构造运动受特提斯构造域远程作用影响，以近东西向挤压为核心，形成近南北向的逆冲断层与褶皱；早—中侏罗世伸展作用塑造走滑双冲构造并为侏罗系煤层形成创造条件，晚侏罗世—晚白垩世经强烈缩短与应力场转换最终定型棋盘格构造；受印度—欧亚板块碰撞远程效应影响，新近纪末期构造活化但强度减弱，喜马拉雅期后趋于稳定（马超等，2019；殷树铮等，2024，2026；甄宇等，2024）（图 2；图 3）。

2 数据与方法

2.1 数据资料

本研究分析了 8 条中央坳陷东部地区盆地级 2D 地震剖面，其中东西向地震剖面 3 条（EW01—EW03），南北向地震剖面 5 条（SN04—SN08）。

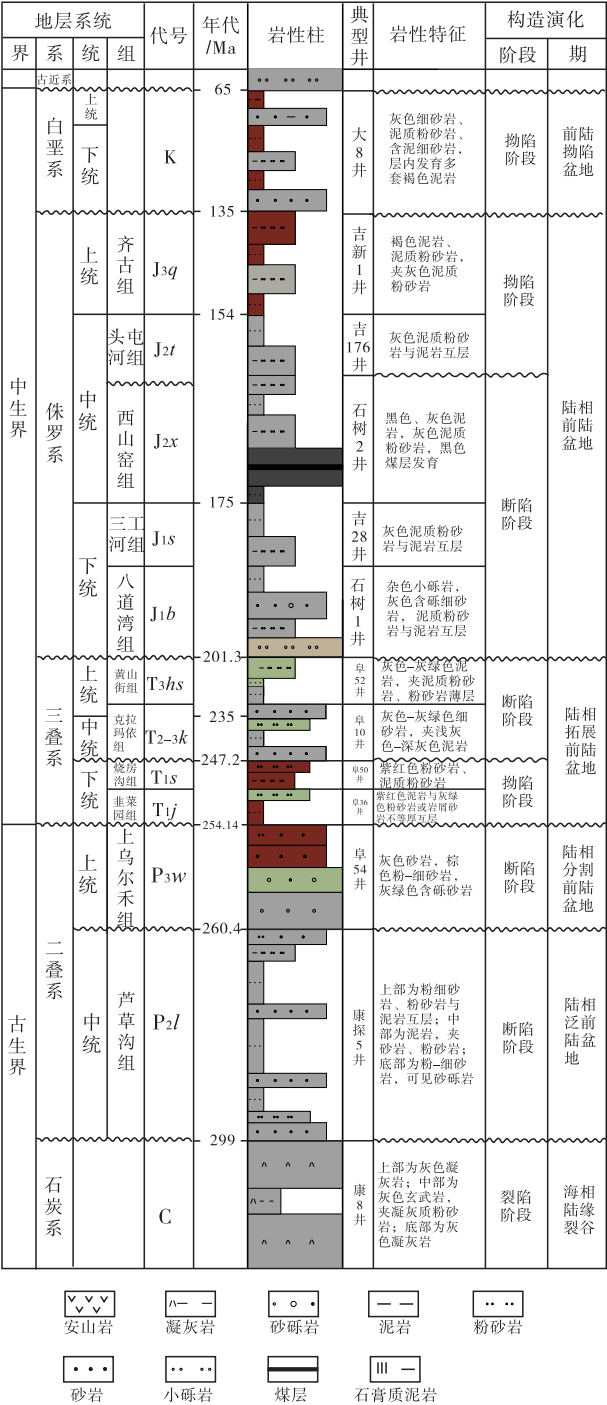


图 2 准噶尔盆地中央坳陷东部地区古生界—中生界综合地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Paleozoic-Mesozoic in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

(图 4)。2D 地震测线双程旅行时范围为 0 ~ 1000 ms，采样间隔为 2 ms，地震测线总长度约 1300 km，平面上呈棋盘格状覆盖中央坳陷东部地区，覆盖面积约 17 000 km² (图 4)。

为确保 2D 地震测线层位解释的准确性，筛选了过地震测线或临近地震测线（垂直投影距离小于 1 km）的 15 口重点井。平面上，15 口重点井覆盖中央坳陷东部地区，且在构造相对复杂的北三台凸起两侧重点分布。

2.2 研究方法

依据 15 口重点井测井资料及井分层数据，开展了详细的井震标定，确保了钻井层位与地震层位解释的一致性。此外，重点构造带附近分布的钻井，能够有效约束跨构造带地层的等时对比性。

本次研究借助 MOVE3D 软件（v2018）的三维构造建模与平衡恢复模块，结合覆盖研究区的 2D 地震剖面、测井及露头资料，开展基于二维地震剖面的构造解译与构造平衡剖面恢复。其中，构造平衡剖面恢复以面积守恒原理（剖面）为核心，通过对变形地层进行几何反演，重建地质体在不同构造演化阶段的原始展布形态，是分析构造变形特征、揭示构造演化过程的关键技术手段。

在构造平衡剖面恢复过程中，对于盆内凸起进行剥蚀量恢复。剥蚀量恢复工作主要通过地震反射界面虚拟外推完成，即对于一个层序界面，自盆地内第 1 个削截点向盆缘方向，按照地层展布趋势，虚拟外推被剥蚀掉的界面，以残存层序界面+虚拟外推层序界面共同构成构造运动抬升剥蚀前的近似层序界面。通过此界面进行构造平衡剖面恢复，能够有效控制盆地内部被剥蚀的正向地貌单元的恢复，重建更加准确的盆山耦合过程(图 5)。剥蚀界面虚拟外推能够有效地校正剥蚀量，尤其对于盆内凸起发育的区域。在本研究中，西泉鼻隆及北三台凸起为盆内物源区，其构造平衡恢复尤其需要采用剥蚀界面虚拟外推的方法。对于 J₂t、K₁q 等存在剥蚀量的地层界面，依据虚拟外推方式获得原始未剥蚀的虚拟界面，采用虚拟界面进行构造平衡恢复，能够有效避免剥蚀区域古高程过度放大的效应(图 5)。

3 构造演化期次及活动强度时空分布

3.1 构造层划分与断裂系统特征

根据地震剖面解释与钻井资料分析，阜康凹陷—吉木萨尔凹陷构造演化可划分为下构造层与上构造层两大构造层(图 6)。下构造层（前二叠系）形成于伸展断陷阶段，受区域伸展作用影响，形成

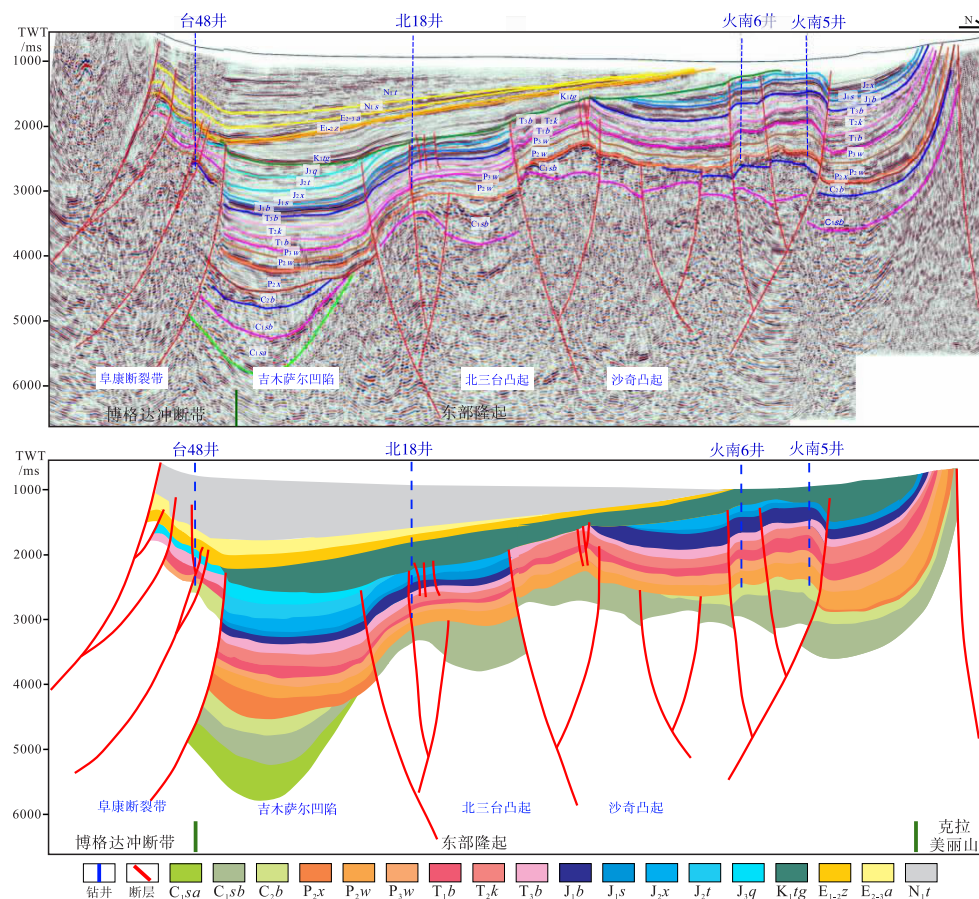


图 3 准噶尔盆地中央坳陷东部地区南北向 SN07 地震剖面地质解释图

Fig. 3 Geological interpretation of north-south seismic profile SN07 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

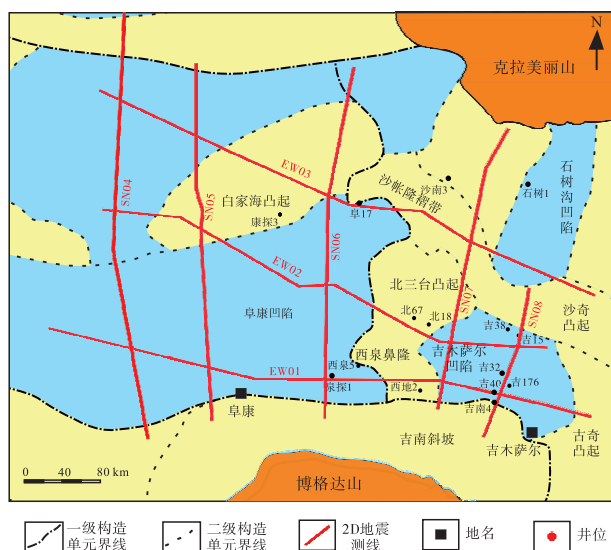


图 4 准噶尔盆地中央坳陷东部地区二维地震测线及标定井分布

Fig. 4 Distribution of 2D seismic lines and calibration wells in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

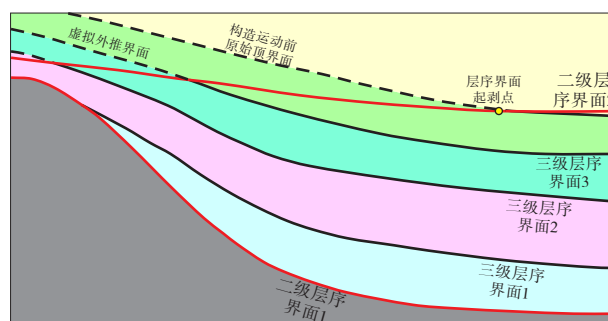
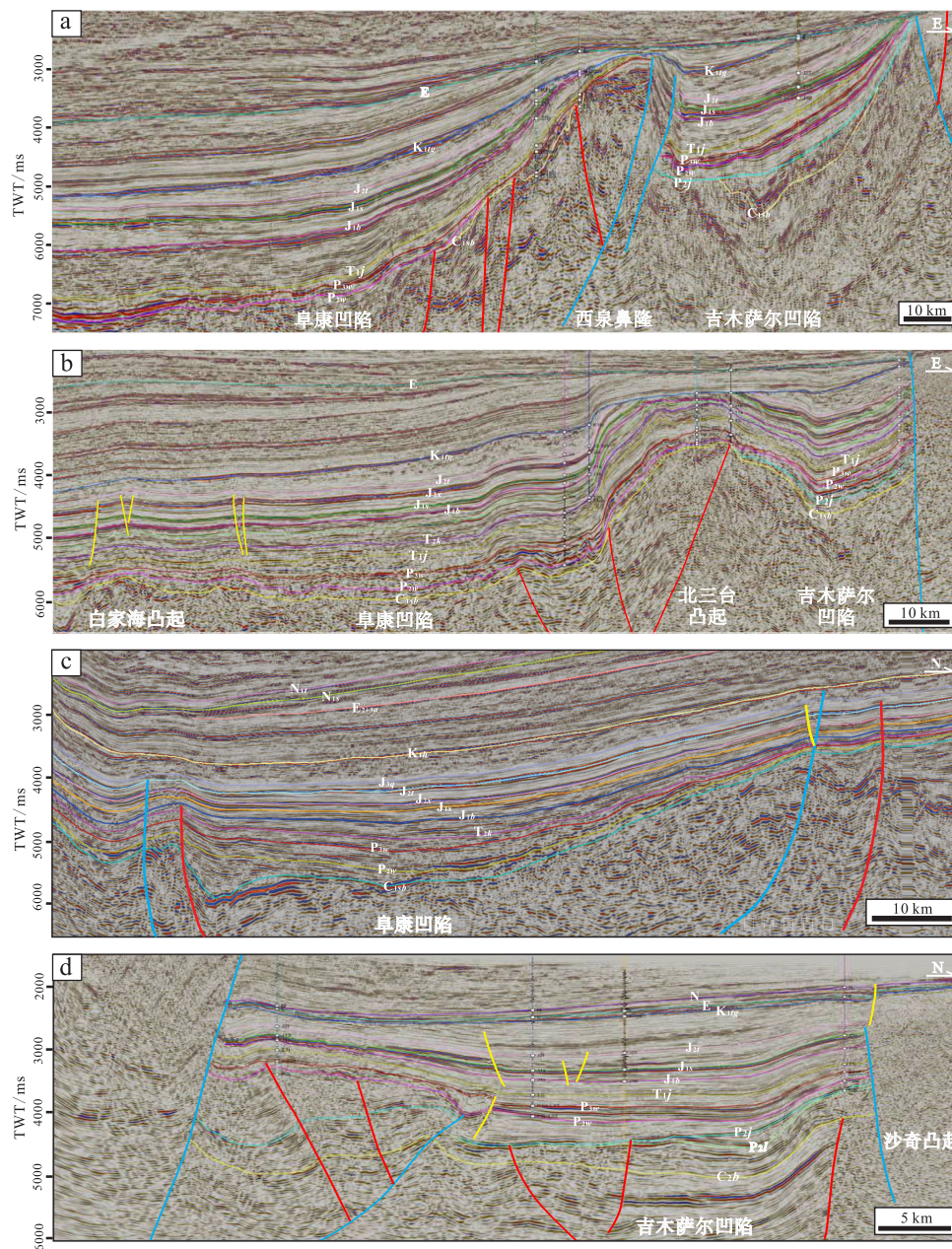


图 5 剥蚀界面虚拟外推方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing virtual extrapolation method for erosion interface

大量北东向拉张裂谷盆地，盆地充填以断控沉积为主，发育石炭纪拉张断裂(图 6，红色断层)，该类断层控制了石炭系的厚度与展布，局部形成厚层火山岩-碎屑岩组合(图 6)。上构造层(二叠系—白垩系)形成于挤压推覆阶段，早期(早二叠世)处于幕式挤压环境，发育压陷结构，控盆断层多为



a—EW01 测线; b—EW02 测线; c—SN06 测线; d—SN08 测线

图 6 准噶尔盆地中央坳陷东部地区典型地震剖面

Fig. 6 Typical seismic profiles in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

石炭纪拉张断裂的活化断层(图 6, 二叠纪—白垩纪再活动断裂, 蓝色断层); 晚期(晚二叠世—白垩纪)挤压作用增强, 发育二叠纪—侏罗纪小尺度局部断层(图 6, 黄色断层), 该类断层多局限于二叠系—侏罗系内部, 对地层的改造作用较弱。

3.2 东西向构造演化期次及时空特征

阜康凹陷东西向地层(EW01—EW03 剖面)自石炭纪以来共发育“拉张期—挤压一期—过渡期

—挤压二期—过渡期”5 期构造演化(图 7; 图 8; 图 9)。

3.2.1 拉张期(石炭纪—中二叠世)

受区域伸展作用控制, 盆地南部(EW01—EW02, 图 7; 图 8)与北部(EW03, 图 9)均发育拉张裂谷, 博格达山与克拉美丽山处于相对稳定状态, 盆山之间以伸展背景下的断陷沉积为主, 石炭系厚度受拉张断裂控制。其中, 在中二叠世拉张

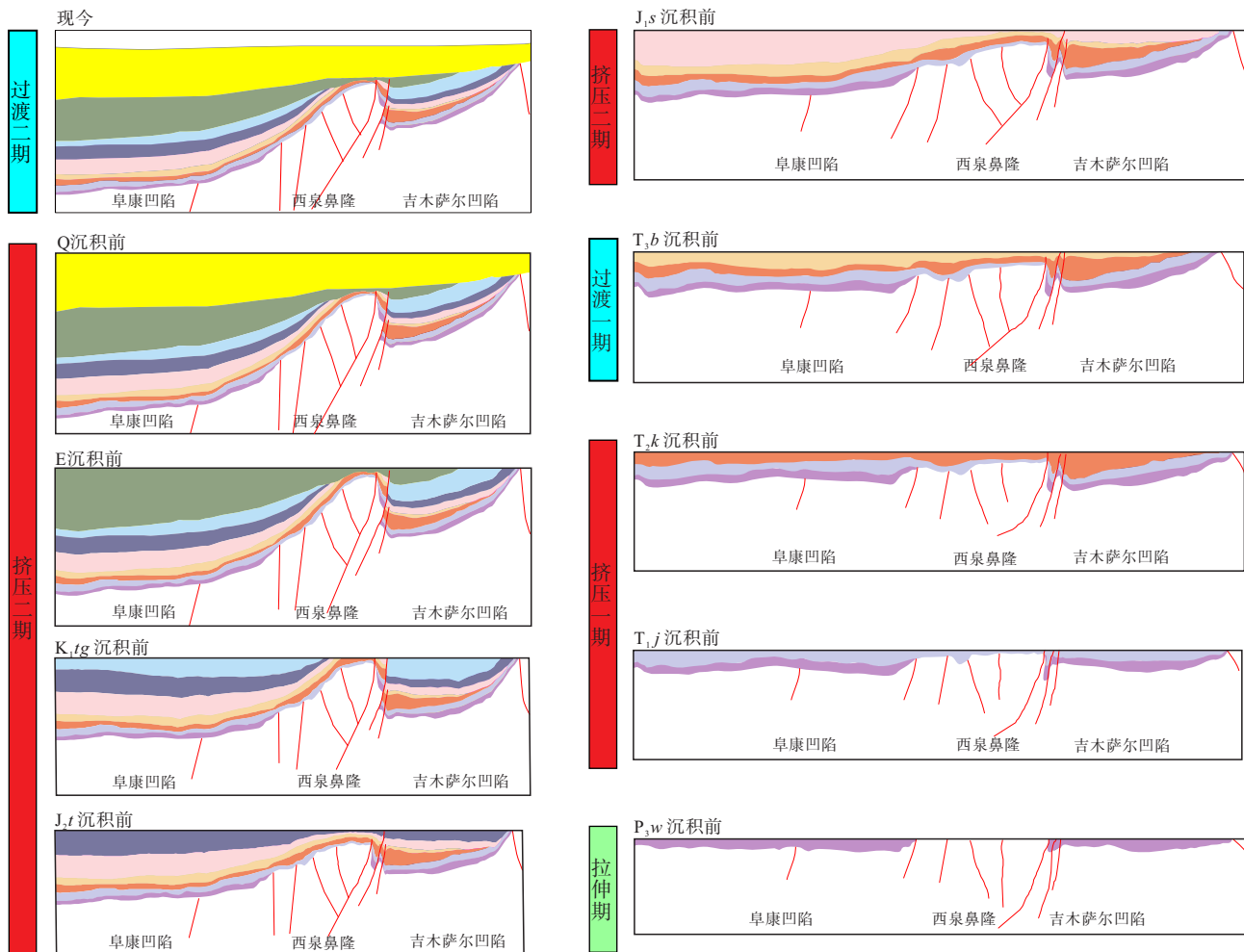


图 7 准噶尔盆地中央坳陷东部地区东西向地震测线 EW01 构造平衡剖面

Fig. 7 Tectonic balance profile of east-west seismic line EW01 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

背景下，西泉鼻隆—北三台凸起发育断隆地貌（EW01，图 7）；吉木萨尔东部边界断裂逆冲，导致吉木萨尔压陷沉积，北三台发育断层挠曲，挠曲高处石炭系被部分剥蚀（EW02，图 8）；中二叠世盆地拉伸运动最强，中央坳陷东部地区地层厚度增加明显（EW03，图 9）。

3.2.2 挤压一期（晚二叠世—早三叠世）

挤压作用自盆地南部（EW01—EW02，图 7；图 8）开始，逐步向北部（EW03，图 9）蔓延，南部挤压强度大于北部，中部（EW02，图 8）挤压作用最强。其中，晚二叠世至早三叠世，盆地东西方向处于挤压环境，西泉鼻隆抬升剥蚀（EW01，图 7）；早三叠世西泉鼻隆西部逆断层最为活跃，断层附近压陷地层厚度增大（EW01，图 7）；晚二叠世研究区受控于东西向挤压一期，以北三台与白家海凸起断层挠曲控边及地层呈中间

凹陷厚、两边凸起薄的特征（EW02，图 8）；自早三叠世开始，盆地进入挤压一期阶段，石树沟凹陷明显发育压陷结构（EW03，图 9）。

3.2.3 第一过渡期（早三叠世—中三叠世）

挤压作用相对停滞，盆地内构造稳定，地层厚度均匀，周缘山系隆升速率减缓，物源供给趋于稳定，盆山耦合作用暂时减弱。其中，中三叠世沉积厚度相对均匀，指示东西向挤压停滞，盆地处于构造过渡期（EW01，图 7）；早三叠世，地层向准噶尔盆地内部增厚，吉木萨尔控边断层逆冲作用较弱，说明整体构造环境稳定（EW02—EW03，图 8；图 9）。

3.2.4 挤压二期（晚三叠世—新近纪）

挤压作用再次增强，仍以南部（EW01—EW02，图 7；图 8）为主，北部（EW03，图 9）挤压强度较挤压一期有所增加。博格达山受挤压而

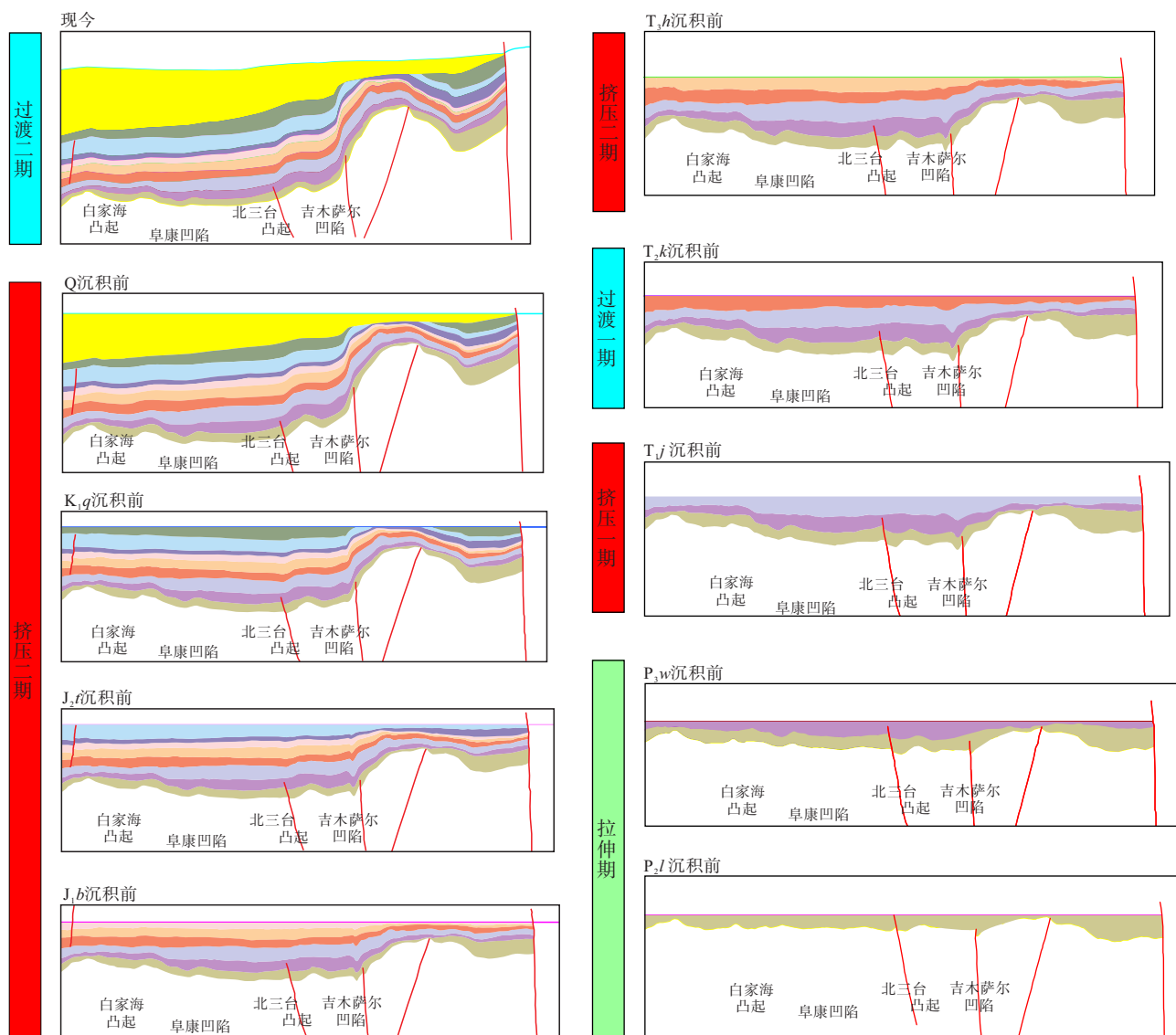


图 8 准噶尔盆地中央坳陷东部地区东西向地震测线 EW02 构造平衡剖面

Fig. 8 Tectonic balance profile of east-west seismic line EW02 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

隆升加剧，向盆地内推进距离增大，形成大规模辫状河三角洲沉积；远场挤压作用下，克拉美丽山隆升作用增强，北部物源贡献提升。盆山耦合进入“双山系隆升—盆地全面压陷”的强响应阶段。其中，晚三叠世至新近纪，盆地处于挤压二期，东西向挤压作用下西泉鼻隆持续隆升，上地层较薄，东、西 2 个凹陷沉积明显增厚（EW01，图 7）；中三叠世—侏罗纪，吉木萨尔边界断裂再次逆冲，吉木萨尔凹陷沉积增厚，同时北三台凸起协调挤压而抬升剥蚀（EW02，图 8）；晚侏罗世开始，地层局部压陷增厚，且向阜康凹陷地层增厚明显（EW03，图 9）。

3.2.5 第二过渡期（第四纪以来）

挤压作用趋于停滞，地层向盆内均匀增厚，周缘山系隆升基本稳定，盆山耦合作用进入“稳定调整”阶段（EW01—EW03，图 7；图 8；图 9）。

3.3 南北向构造演化期次及时空特征

中央坳陷东部地区南北向（SN04—SN08 剖面）发育“拉张期—过渡期—挤压一期—过渡期—挤压二期—过渡期”6 期构造演化，整体规律与东西向相似，但挤压作用的时空分布与盆山耦合响应存在显著差异（图 10 至图 14）。构造特征为：伸展断陷阶段形成拉张裂谷盆地，发育下构造层；以石炭纪拉张断裂为主，断控沉积明显；构造活动自

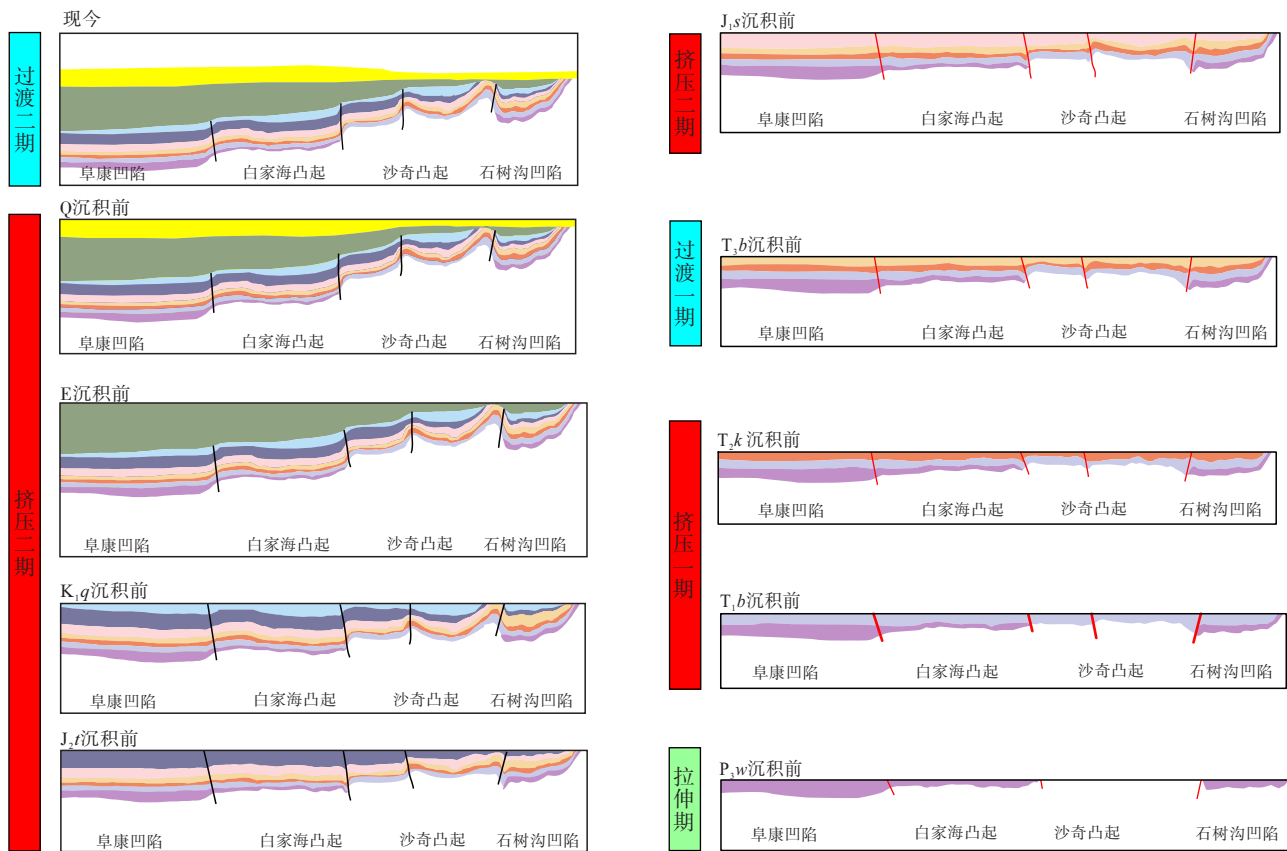


图 9 准噶尔盆地中央坳陷东部地区东西向地震测线 EW03 构造平衡剖面

Fig. 9 Tectonic balance profile of east-west seismic line EW03 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

北三台凸起（西泉鼻隆）起始，早期为断隆结构；盆地充填以断控沉积为主。

3.3.1 拉张期（石炭纪—二叠纪）

盆地西部（SN04—SN05，图 10；图 11）与东部（SN07—SN08，图 13；图 14）均发育拉张断陷，石炭系厚度受拉张断裂控制明显，东部断陷规模大于西部，从北三台凸起起始，早期为断隆结构，此时克拉美丽山前压陷结构明显，指示北部造山过程（SN07，图 13）。此阶段博格达山未发生明显隆升，盆山耦合作用较弱。其中，盆地局部具有断控增厚特征（SN04—SN08，图 10 至图 14），无明显压陷结构发育（SN04—SN05，图 10；图 11），白家海凸起略微隆起（SN05，图 11）。

3.3.2 第一过渡期（早三叠世—中三叠世）

从拉张向挤压过渡，构造活动减弱，整体稳定（SN04—SN08，图 10 至图 14）。前期拉张断裂初步活化，南北向地层展布均匀，无明显压陷/拉张差异。

3.3.3 挤压一期（晚三叠世—侏罗纪）

挤压作用自盆地东部（SN07—SN08，图 13；图 14）开始，呈“剪刀状”向西部（SN04—SN05，图 10；图 11）延伸，东部挤压强度大于西部。克拉美丽山受挤压率先隆升，成为主要物源区，向盆地内提供大量碎屑物质；博格达山受挤压隆升较弱，南部物源贡献较小。其中，东道海子与阜康凹陷均出现压陷结构，中部莫索湾凸起协调隆升且持续至晚侏罗世（SN04，图 10）；SN05 剖面在阜康凹陷压陷增厚，白家海凸起快速隆升；SN06 剖面压陷特征明显，阜康凹陷地层增厚，白家海凸起协调隆升（图 12）；SN07—SN08 剖面沉积厚度相对均匀，指示南北向挤压停滞。整体上，盆山耦合表现为“东部山系隆升—盆地东部压陷”的响应模式。

3.3.4 第二过渡期（晚侏罗世—早白垩世）

南北向挤压暂缓，进入构造平稳期。南北向地层沉积厚度均匀，无明显构造控制差异，无压陷/拉张差异，凸起活动减弱。

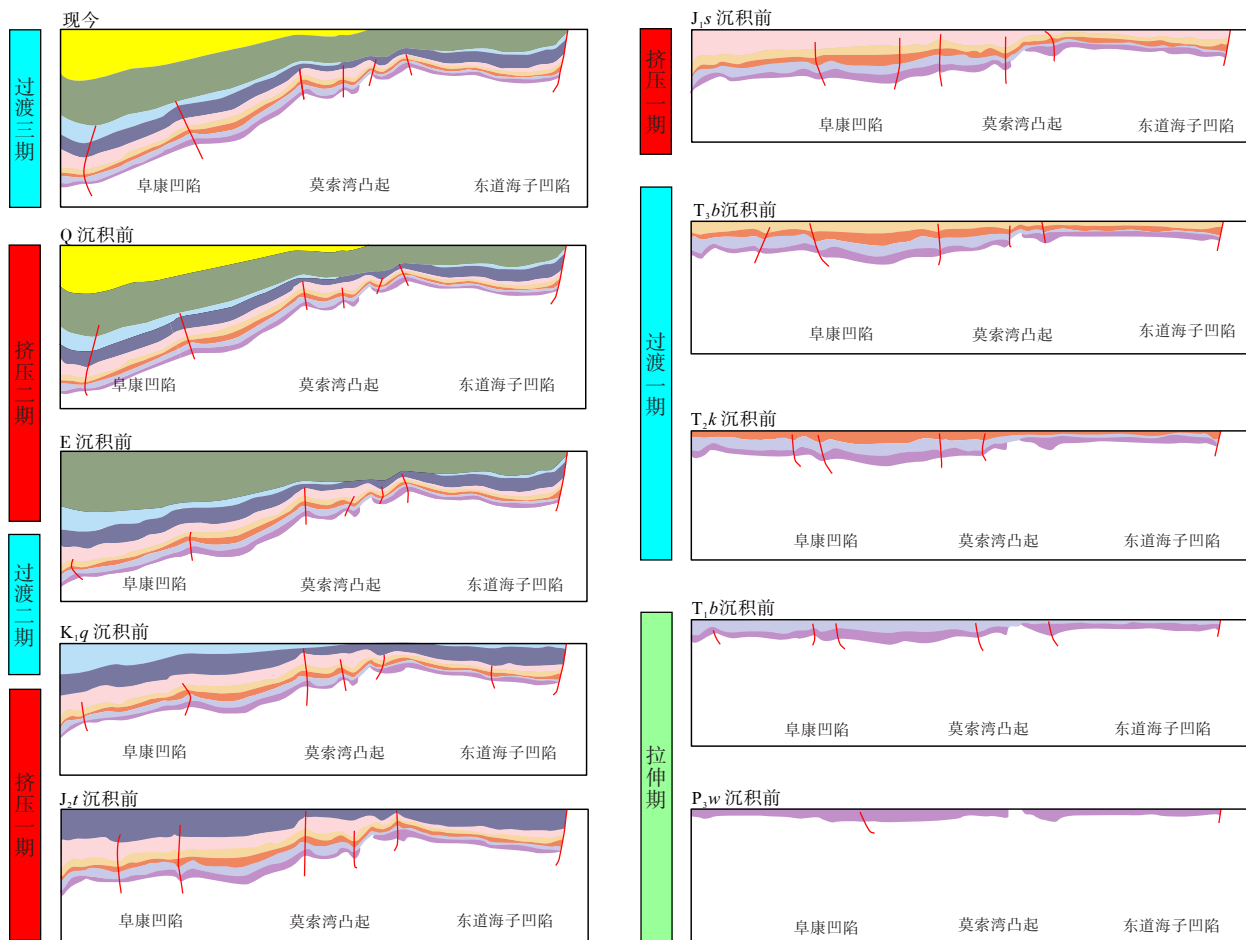


图 10 准噶尔盆地中央坳陷东部地区南北向地震测线 SN04 构造平衡剖面

Fig. 10 Tectonic balance profile of south-north seismic line SN04 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

3.3.5 挤压二期（晚白垩世—古近纪）

此阶段挤压强度最大、持续时间最长，挤压作用向西部蔓延，西部（SN04—SN05，图 10；图 11）2 期挤压持续时间大致相同，中部（博格达山前带，SN07，图 13）挤压二期规模大于一期。压陷作用南移至博格达山前，博格达山受挤压隆升加剧（孙自明和沈杰，2014），逐步取代克拉美丽山成为主要物源区，南部沉积中心向盆地内迁移；克拉美丽山挤压减弱、隆升强度降低，北部物源贡献降低。沙奇凸起自东向西隆起，分隔吉木萨尔与石树沟凹陷。其中，SN04 剖面指示晚白垩世再次发育南北向挤压，北部隆升、南部压陷（图 10）；SN06 剖面指示晚白垩世南北向挤压明显，压陷结构南移（图 12）；SN07 剖面指示博格达山前压陷显著，吉木萨尔凹陷地层增厚（图 13）；SN08 剖面指示沙奇凸起隆起，凹陷地层增厚（图 14）。整体上，该阶段盆山耦合呈现“西部山系隆升增强—盆地

西部压陷加剧”的迁移特征。

3.3.6 第三过渡期（新近纪—第四纪）

全盆地挤压停滞，进入稳定沉降阶段。南北向地层向盆内均匀增厚，无构造控制沉积差异，所有断裂活动基本停止。

4 盆山耦合过程及对油气勘探的指示意义

综合东西向与南北向构造演化特征，中央坳陷东部地区构造演化的时空差异显著，控制着该地区盆山耦合过程。

4.1 挤压作用的时空迁移

整体上，SN07 测线是指示南北构造过程的核心剖面，完整记录了从早期“北强南弱”到晚期“南强北弱”的转换，而 EW02 测线（过北三台凸

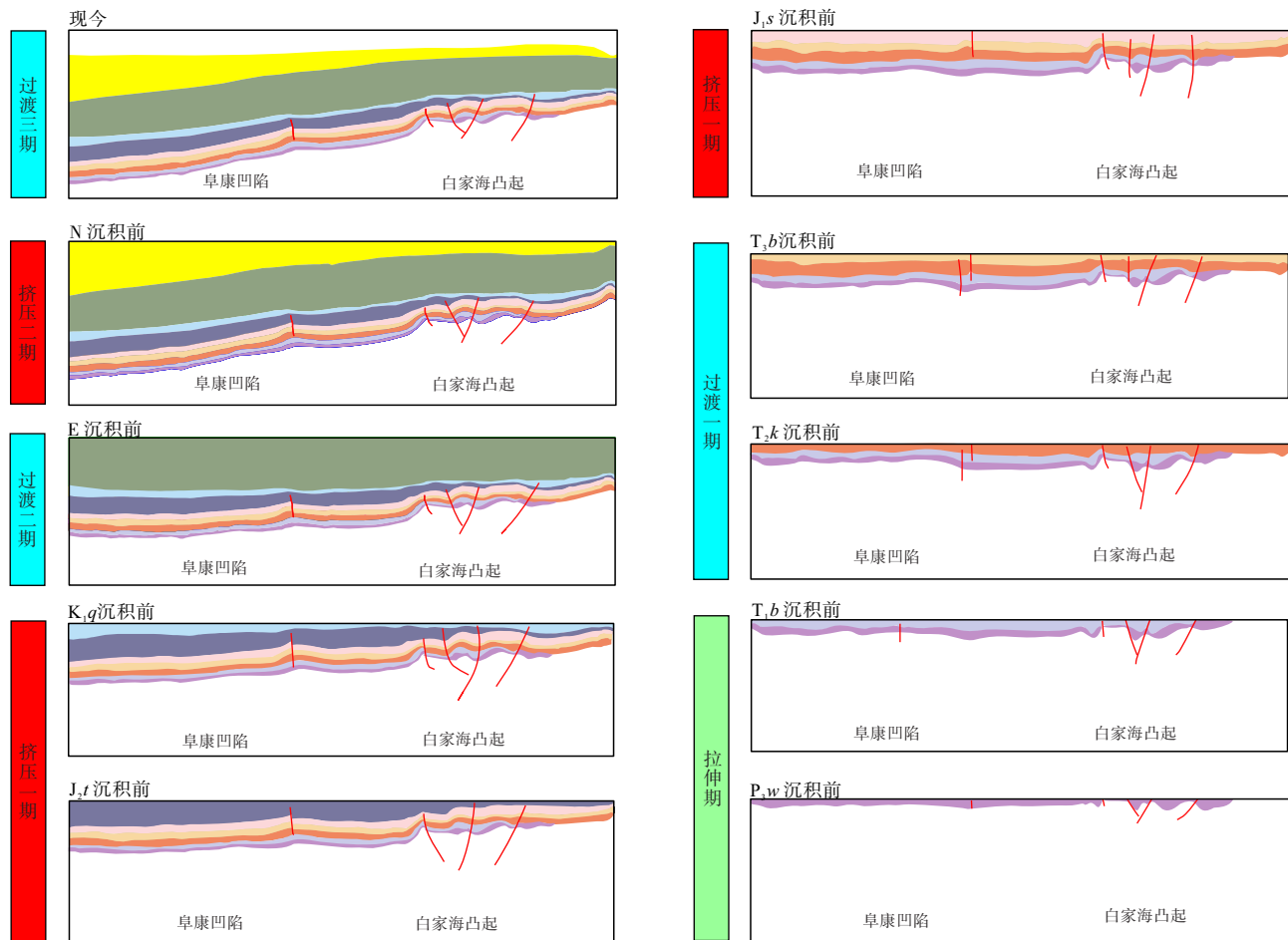


图 11 准噶尔盆地中央坳陷东部地区南北向地震测线 SN05 构造平衡剖面

Fig. 11 Tectonic balance profile of south-north seismic line SN05 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

起)是盆内稳定区与边界变形区的过渡带,同时也是围限盆地(walled basin)“盆核稳定—边缘变形”的关键证据(Carroll *et al.*, 2010)。

东西向挤压从南部开始,北部相对滞后,盆地南部(EW01—EW02)挤压强度整体上大于北部(EW03),中部挤压作用相对最强(EW02)(表1)。南北向挤压始于中二叠世且从东部开始,逐步蔓延至西部,西部南北向挤压始于中三叠世(表1)。Carroll等(1990)根据博格达山区西部的露头研究认为中央坳陷东部地区南北向挤压启动始于晚三叠世,此认识与本研究对SN04—SN05测线的认识相接近,但忽略了盆地不同位置挤压的起始时间不一致。整体上,盆地西部(SN04—SN05)2期挤压持续时间大致相同,中部(博格达山前带SN07—SN08)挤压二期规模大于挤压一期,且挤压一期起始于盆地东部(Carroll *et al.*, 2010),呈剪刀状向西部开口闭合延伸(表1)。

东西向2期挤压发育早于南北向,但持续周期短(挤压一期约15 Ma,挤压二期约20 Ma,时间按照国际地质年代表估算);南北向挤压开始晚,但持续时间长(挤压一期约20 Ma,挤压二期约30 Ma)。这种差异导致周缘山系的隆升呈现“南早北晚、东早西晚”的规律,在挤压远程效应下博格达山隆升持续时间最长(史燕青, 2020; Shi *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020),克拉美丽山次之(杨庚和钱祥麟, 1995; 朱文斌等, 2006; 王家林等, 2016; Wang *et al.*, 2018a, 2018b)。

4.2 盆山耦合过程及其控制机制

准噶尔盆地东西向与南北向构造平衡剖面特征指示了盆地内部构造凸起与周缘凹陷的盆山耦合过程(图15)。其中,EW02、EW03、SN07剖面指示北三台凸起(西泉鼻隆)发育最早,起始于石炭纪拉张一期,早期北三台凸起为拉张背景下的断隆

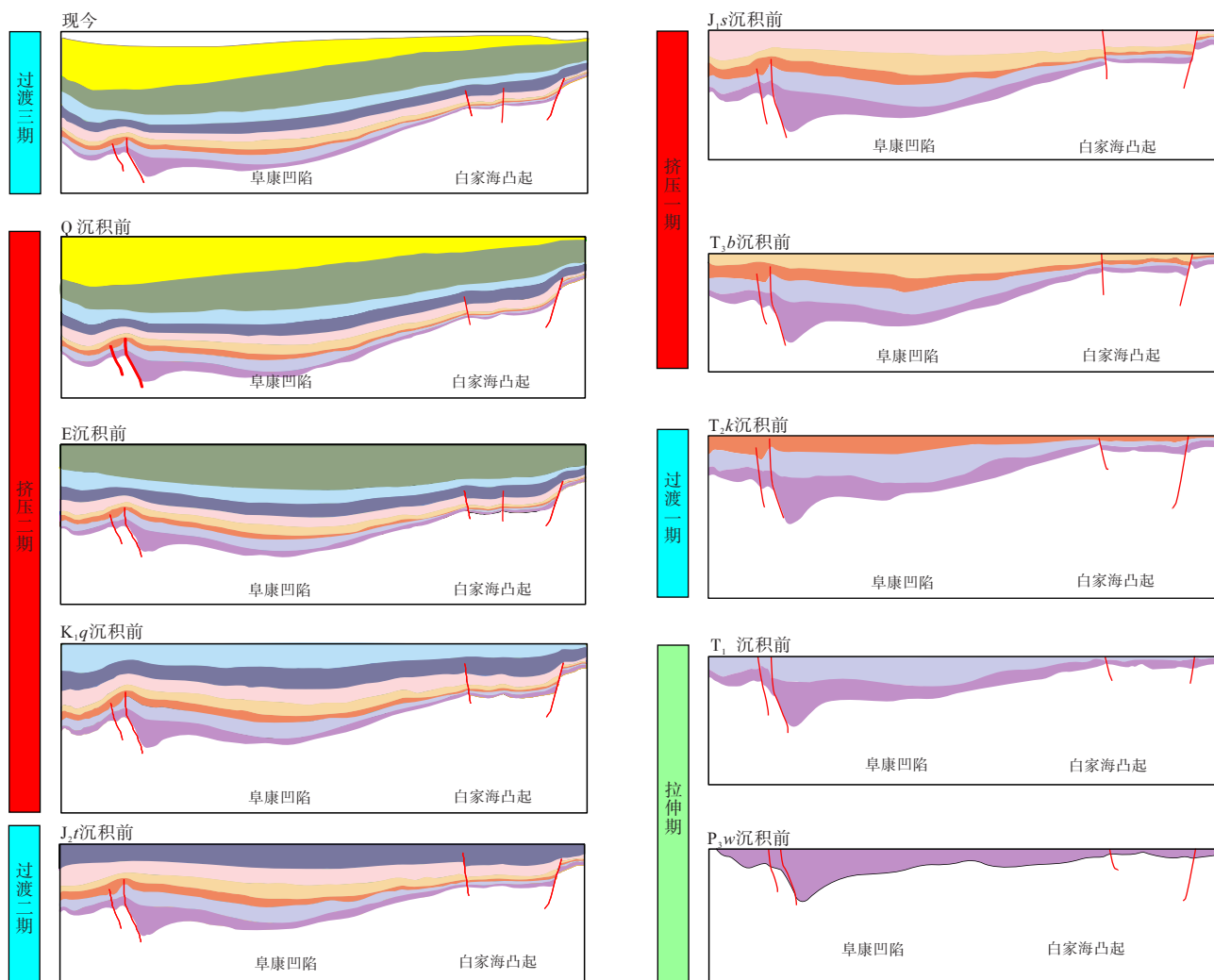


图 12 准噶尔盆地中央坳陷东部地区南北向地震测线 SN06 构造平衡剖面

Fig. 12 Tectonic balance profile of south-north seismic line SN06 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

结构,在挤压二期反转为逆冲推覆隆起(图 15-a;表 1)。孙自明和沈杰(2014)对北三台凸起逆冲起始于晚侏罗世的认识受限于早期对深部二叠系展布的局限性。殷树铮等(2024)指出北三台凸起区域石炭系发育生长断层,自早二叠世开始为剥蚀区域,中二叠世末期伴随阜康凹陷进入前陆盆地阶段而发生挤压隆升。唐勇等(2022a, 2022b)依据北三台凸起沙 105 井、西泉 3 井的声波时差法估算,北三台凸起芦草沟组剥蚀量整体在 30~200 m 之间,其中西泉鼻隆高部位剥蚀量最大(100~200 m)(EW01,图 7),周缘斜坡带剥蚀量逐渐减小(30~80 m)(EW02,图 8)。结合本研究对过北三台凸起地震测线构造平衡剖面解析的认识,认为北三台凸起早期为断隆结构或翘倾断块,后期遭

受构造挤压而抬升剥蚀(图 8;图 9;图 13)。EW03、SN04—SN06 剖面指示白家海凸起与莫索湾凸起仅发育于挤压一期,受克拉美丽山隆升的挤压作用控制(图 15-b;表 1)。南北走向 SN08 剖面指示在沙奇凸起边界断层南部吉木萨尔凹陷内,三叠系及下伏地层厚度分布稳定(图 14),且靠近沙奇凸起边界断层未见厚度渐小及地层界面上超的特征,同时靠近沙奇凸起边界断层时吉木萨尔凹陷地层无牵引变形的明显结构(图 14),表明三叠纪前沙奇凸起并未发育,其或为岩浆上涌熔融形成的相对较年轻的盆内凸起,吉木萨尔凹陷与北部石树沟凹陷或为连通的大凹陷(图 15-b, 15-c)。此外,SN07 剖面显示沙奇凸起西部发育中二叠统,指示其隆升相对较晚(图 13)。综上所述,沙奇凸起开

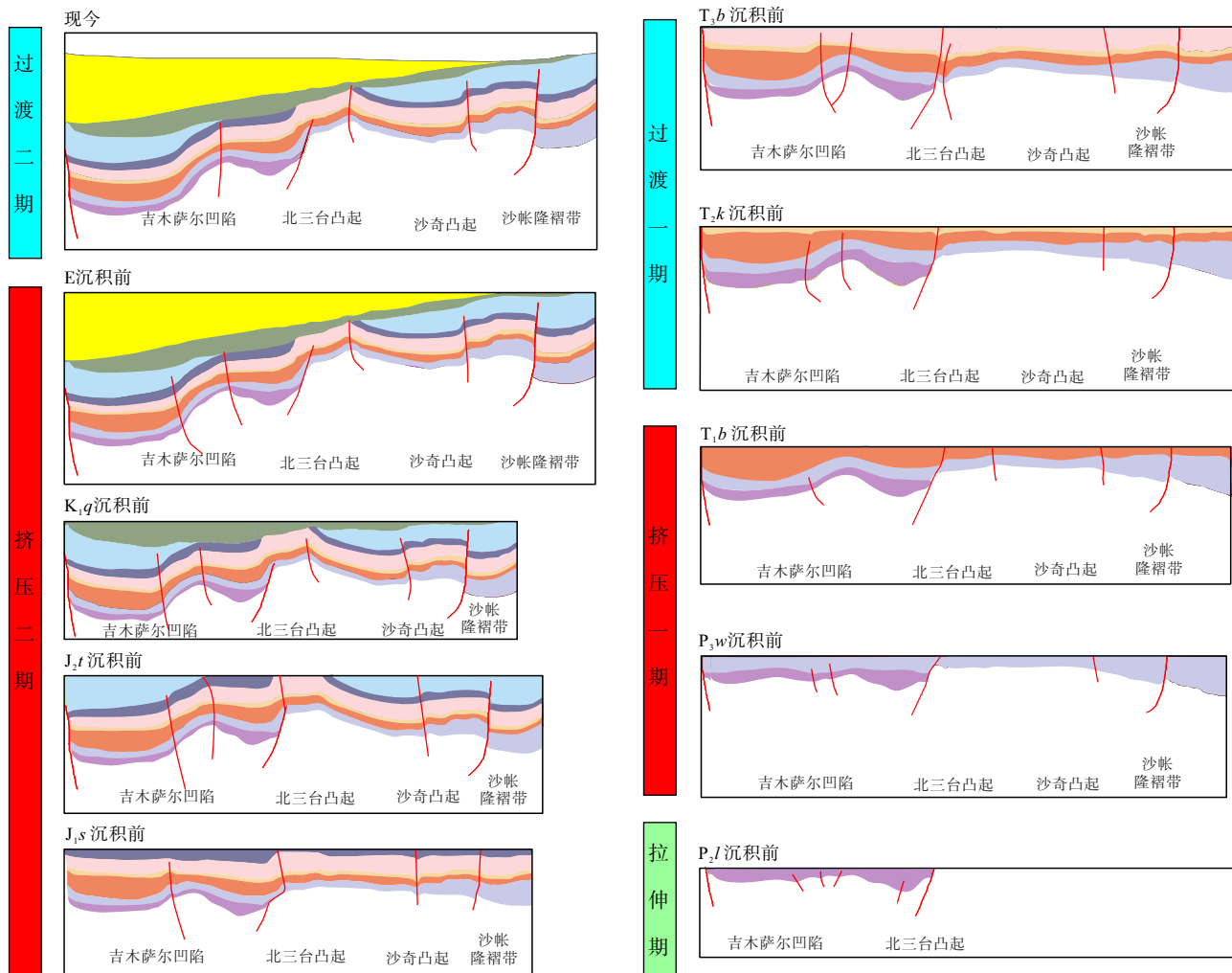


图 13 准噶尔盆地中央坳陷东部地区南北向地震测线 SN07 构造平衡剖面

Fig. 13 Tectonic balance profile of south-north seismic line SN07 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

始发育相对较晚，其形成于挤压二期，主体发育过程受博格达山挤压隆升的影响，呈自东向西渐次隆起（杨庚和钱祥麟，1995；李丽等，2008）（图 15-c；表 1）。

综上所述，由于中央坳陷东部地区东西向 2 期挤压发育早于南北向，因此研究区范围内南北向构造凸起发育时间应当略早于东西向构造凸起，故盆地内部先发育东西向分隔，进而发育南北向分隔（Liu *et al.*, 2022）（图 15）。在上述构造演化过程的控制下，石炭纪—晚二叠世克拉美丽山在挤压作用下逆冲推覆，成为中央坳陷东部主力物源区（李锦轶等，1990；Carroll *et al.*, 2010；张磊等，2020）。博格达山在远场挤压作用下，逆冲始于晚二叠世（史燕青，2020；Shi *et al.*, 2020；Zhao *et al.*, 2020）（图 15）。由于盆地内南北向构造凸

起发育略早于盆地东西向构造凸起，沉积物先受限于南北向构造约束，主要发育南北向沉积分散过程，直至晚二叠世—早侏罗世，受控于东西向构造凸起的发育，阻隔了南北向物源体系的贯通分散（师志龙，2002）（图 15）。

区域板块运动是盆山耦合过程的根本驱动力，克拉美丽洋盆闭合过程、西伯利亚板块与印度板块的碰撞远程效应主导了博格达山与克拉美丽山的多期隆升（何登发等，2018；易泽军等，2018；张磊等，2020）。断裂系统的活化与反转是盆山耦合的直接表现，中央坳陷东部地区早期拉张形成的正断层约束了盆内正向构造单元的发育位置，后期在挤压构造背景下反转形成逆冲断块（郑孟林等，2018）。二叠纪—白垩纪，反转断裂的持续活动沟通了山系与盆地的物质交换，挤压作用的时空差异导致沉积

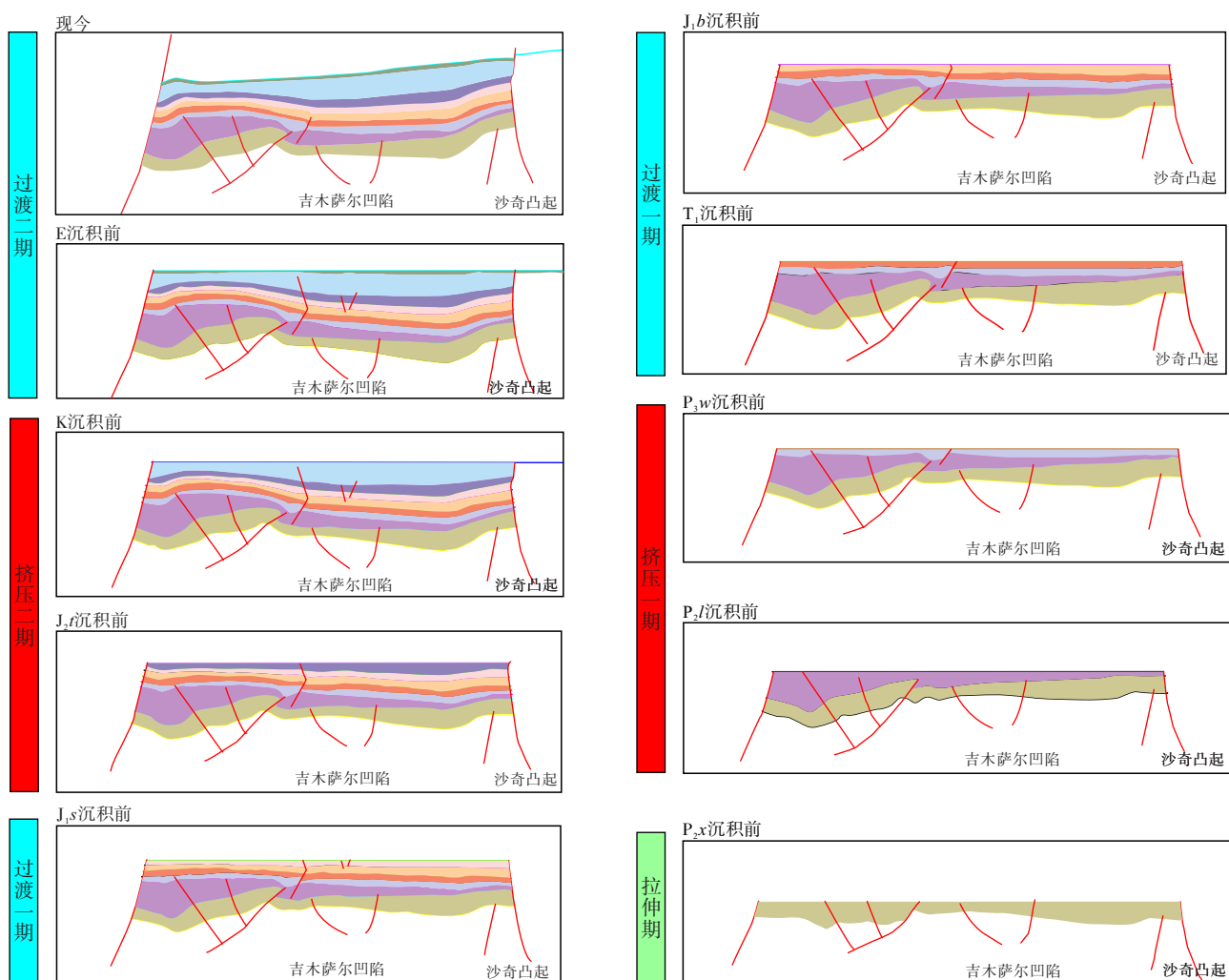


图 14 准噶尔盆地中央坳陷东部地区南北向地震测线 SN08 构造平衡剖面

Fig. 14 Tectonic balance profile of south-north seismic line SN08 in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

中心发生“南早北晚、东早西晚”的动态变迁（师志龙，2002；郭召杰等，2006）。上述过程共同奠定了中央坳陷东部地区盆山耦合的格局（图 15）。

4.3 盆山耦合过程对油气勘探的指示意义

盆山耦合过程对烃源岩及储集层的分布具有显著的控制作用（吴晓智等，2012；曹正林等，2024；支东明等，2024）。中二叠统芦草沟组为研究区主力优质烃源岩，受海西晚期构造作用控制，呈现凹陷中心厚度大、凸起区减薄或尖灭的特征（图 15-a），有机质类型以 I-II 型为主，生烃能力强，于晚三叠世—中侏罗世进入主生油期，晚侏罗世—早白垩世进入高成熟—过成熟生气阶段（吴晓智等，2012；曹正林等，2024；支东明等，2024）。二叠系发育研究区的主力储集层，受隆坳

格局与盆山物源控制，在凸起周缘斜坡带发育扇三角洲、辫状河三角洲砂砾岩及云质砂岩等优质储集层，环绕凸起呈环带状展布，与烃源岩侧向对接良好（图 15-a）（吴晓智等，2012；曹正林等，2024；支东明等，2024）。三叠系储集层以河流—三角洲砂岩为主，受印支期整体沉降与准平原化作用控制，砂体全区广泛分布，连通性好，是重要的侧向运移通道（图 15-b）（郑孟林等，2018）。在盆山耦合过程的整体控制下，研究区形成了海西期近源自生自储、下生上储及印支期远源侧向运移等多类源储组合，其中二叠系近源组合为最有利的成藏组合类型。

受盆山耦合过程的驱动，油气运移期次和圈闭发育演化与构造演化阶段高度耦合（吴晓智等，2012；卢炳雄等，2018；郑孟林等，2018；曹正林

表 1 准噶尔盆地中央坳陷东部地区构造演化期次与盆地耦合过程对比

Table 1 Comparison of basin-mountain coupling processes and tectonic evolution phases in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

格架线号	石炭纪		二叠纪			三叠纪			侏罗纪			白垩纪		E-Q
	早	晚	早	中	晚	早	中	晚	早	中	晚	早	晚	
EW03	北三台					北三台								
EW02	北三台					北三台								
EW01	西泉鼻隆					西泉鼻隆								
SN04						莫索湾								
SN05						白家海								
SN06						白家海								
SN07	北三台					北三台								
SN08						沙奇								

注：绿色为拉伸期，蓝色为过渡期，红色为挤压期。黄色及文字为凸起及其名称。

等，2024)。早三叠世—中三叠世（印支早期），受差异沉降与生烃增压驱动，石炭系与中二叠统烃源岩早期成熟，油气沿砂体与不整合面短距离侧向运移，在凹陷内及凸起边缘形成小型原生构造-岩性圈闭油藏（吴晓智等，2012；曹正林等，2024；支东明等，2024）。晚三叠世—中侏罗世（印支晚期—燕山早期），为中二叠统主力烃源岩主生油期，油气在弱挤压背景下大规模侧向运移，沿不整合面、砂岩输导层由凹陷向凸起定向运移，在斜坡带形成地层、岩性及低幅度构造圈闭油藏，为重要的原生油藏形成阶段（郑孟林等，2018；李明瑞等，2025）。晚侏罗世—早白垩世（燕山中晚期），为研究区决定性成藏期，受强挤压反转与构造隆升影响，断裂强烈活化，油气以垂向运移与侧向运移相结合的方式运聚，早期油藏调整改造与晚期天然气充注同步发生，在定型的构造圈闭中形成大规模混源油气藏（郑孟林等，2018）。圈闭发育演化与构造运动同步，不同阶段形成类型各异的圈闭：海西期，受同沉积断裂与隆坳分异控制，发育岩性、地层超覆及低幅度鼻状锥形圈闭（图 15-a）（吴晓智等，2012；郑孟林等，2018）；印支期，受整体

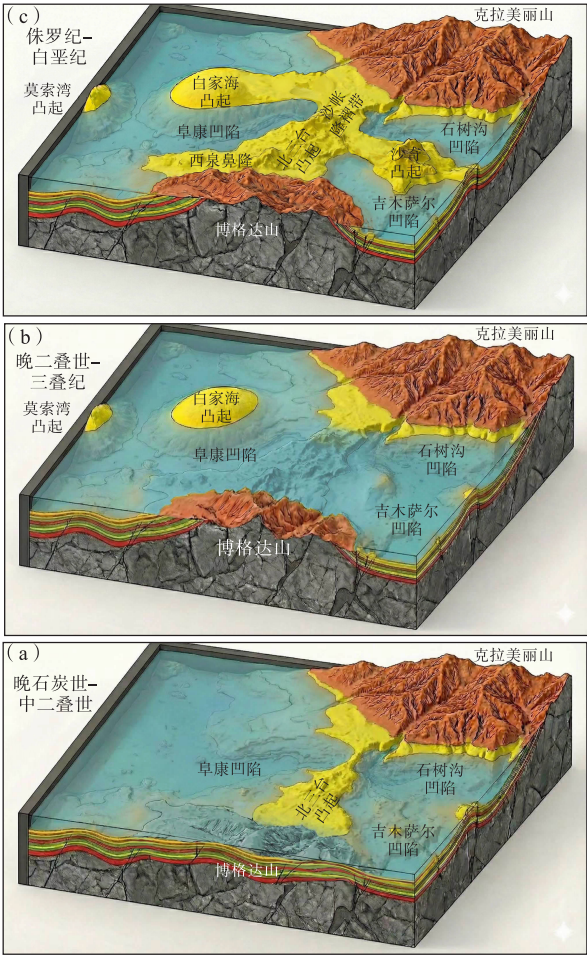


图 15 准噶尔盆地中央坳陷东部地区晚石炭世—白垩纪盆地耦合模式

Fig. 15 Late Carboniferous-Cretaceous basin-mountain coupling models in eastern part of Central Depression, Junggar Basin

沉降与小幅隆升控制，继承发育地层不整合、岩性尖灭及低幅度构造圈闭（图 15-b）（吴晓智等，2012；郑孟林等，2018），不整合面对圈闭形成具有重要控制作用；燕山中晚期，受强挤压反转与逆冲断裂活动控制，背斜、断背斜、断块及构造-岩性圈闭大规模定型（图 15-c）（吴晓智等，2012；郑孟林等，2018），圈闭完整性与保存条件优良，与主成藏期匹配最佳，是最有利的圈闭类型。整体而言，油气运移与圈闭发育呈现良好的耦合匹配关系，燕山中晚期构造定型与主运移期耦合形成高效成藏系统，印支晚期—燕山早期岩性地层圈闭与侧向运移耦合形成斜坡带规模成藏，后期构造调整则促使次生油气藏形成。

综上所述，准噶尔盆地中央坳陷东部地区油气勘探具有明确的方向：区带优选上，白家海凸起等

燕山中晚期定型构造带为首选勘探区, 断裂沟通主力烃源岩, 成藏条件优越; 阜康凹陷南斜坡等构造-岩性复合圈闭发育区为重要接替区; 海西-印支期继承性斜坡带的地层、岩性圈闭为次要勘探目标。层系优选上, 中二叠统为最有利主力勘探层系, 三叠系与侏罗系为重要勘探层系, 石炭系为潜力层系。

5 结论

1) 准噶尔盆地中央坳陷东部地区的构造演化控制了构造层(石炭纪伸展断陷)与上构造层(二叠纪-白垩纪挤压推覆)的发育, 伴随的断裂系统包括石炭纪拉张断裂、二叠纪-白垩纪再活动断裂及二叠纪-侏罗纪小尺度局部断层。

2) 准噶尔盆地中央坳陷东部地区东西向构造演化可划分为“拉张期-挤压一期-过渡期-挤压二期-过渡期”5个阶段; 南北向可划分为“拉张期-过渡期-挤压一期-过渡期-挤压二期-过渡期”6个阶段。东西向2期挤压发育早于南北向挤压, 但持续周期短, 且挤压从南部开始, 北部相对滞后; 南北向挤压开始晚, 其从东部开始, 逐步蔓延至西部, 呈剪刀状向西部开口闭合延伸, 持续时间长。

3) 北三台凸起发育最早, 起始于拉张期, 早期为断隆结构, 挤压二期反转为逆冲推覆隆起; 白家海与莫索湾凸起仅发育于挤压一期; 沙奇凸起发育较晚, 且呈自东向西的隆起发育过程。由于中央坳陷东部地区东西向2期挤压发育早于南北向挤压, 故盆地内部早期先发育东西向分隔, 进而发育南北向分隔, 因而沉积物先受限于南北向构造约束, 直至晚二叠世-早侏罗世东西向白家海-沙奇凸起的发育阻隔了南北向物源体系的贯通分散, 中一晚侏罗世东西向挤压导致南北向北三台凸起挤压隆升, 继续向周缘提供物源。

4) 准噶尔盆地中央坳陷东部地区的油气勘探有利区域为白家海凸起与阜康凹陷南斜坡等构造-岩性复合圈闭发育区, 以中二叠统为最有利主力勘探层系, 三叠系与侏罗系为重要勘探层系, 石炭系为潜力层系。

参考文献 (References)

蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 2000. 准噶尔盆地的类型和构造演化. 地质

前缘, 7(4): 431-440. [Cai Z X, Chen F J, Jia Z Y. 2000. Types and tectonic evolution of Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 431-440]

曹正林, 周川闽, 龚德瑜, 王瑞菊, 丁立华, 杨春, 张志杰. 2024. 准噶尔盆地中一下二叠统构造-岩相古地理特征与烃源岩分布. 石油学报, 45(9): 1349-1371. [Cao Z L, Zhou C M, Gong D Y, Wang R J, Ding L H, Yang C, Zhang Z J. 2024. Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle-Lower Permian in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(9): 1349-1371]

陈发景, 汪新文, 汪新伟. 2005. 准噶尔盆地的原型和构造演化. 地质前缘, 12(3): 77-89. [Chen F J, Wang X W, Wang X W. 2005. Prototype and tectonic evolution of the Junggar Basin, northwestern China. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 77-89]

陈业全. 2004. 塔中地区火山岩预测的综合地球物理方法. 山东东营: 石油大学出版社. [Chen Y Q. 2004. *Comprehensive Geophysical Methods for Volcanic Rock Prediction in Tazhong Area, Tarim Basin*. Dongying, Shandong: China University of Petroleum Press]

方世虎, 贾承造, 郭召杰, 宋岩, 徐怀民, 刘楼军. 2006. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义. 地质前缘, 13(3): 108-121. [Fang S H, Jia C Z, Guo Z J, Song Y, Xu H M, Liu L J. 2006. New view on the Permian evolution of the Junggar Basin and its implications for tectonic evolution. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 108-121]

郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. 地质学报, 80(1): 1-15. [Guo Z J, Zhang Z C, Wu C D, Fang S H, Zhang R. 2006. The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1-15]

何登发, 陈新发, 张义杰, 况军, 石昕, 张立平. 2004. 准噶尔盆地油气富集规律. 石油学报, 25(3): 1-10. [He D F, Chen X F, Zhang Y J, Kuang J, Shi X, Zhang L P. 2004. Enrichment characteristics of oil and gas in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 25(3): 1-10]

何登发, 张磊, 吴松涛, 李涤, 甄宇. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征. 石油与天然气地质, 39(5): 845-861. [He D F, Zhang L, Wu S T, Li D, Zhen Y. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 845-861]

李涤. 2016. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li D. 2016. *Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China*. Doctoral dissertation of China Universities of Geosciences(Beijing)]

李锦铁, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 朱宝清, 冯益民. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. 地质论评, 36(4): 305-316. [Li J Y, Xiao X C, Tang Y Q, Zhao M, Zhu B Q, Feng Y M. 1990. Main characteristics of Late Paleozoic plate tectonics in the southern part of east Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305-316]

- 李丽,陈正乐,祁万修,王世新,陈宣华,吴益平,宫红良,魏新昌,杨屹,李学智. 2008. 准噶尔盆地周缘山脉抬升—剥露过程的 FT 证据. 岩石学报, 24(5): 1011–1020. [Li L, Chen Z L, Qi W X, Wang S X, Chen X H, Wu Y P, Gong H L, Wei X C, Yang Y, Li X Z. 2008. Apatite fission track evidence for uplifting-exhumation processes of mountains surrounding the Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1011–1020]
- 李明瑞,肖冬生,马强,康积伦,李士林,张伟,王力龙. 2025. 准噶尔盆地阜康凹陷东部二叠系—三叠系复式油气成藏特征及勘探方向. 中国石油勘探, 30(6): 1–12. [Li M R, Xiao D S, Ma Q, Kang J L, Li S L, Zhang W, Wang L L. 2025. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration orientation of the Permian–Triassic composite petroleum system in the eastern Fukang sag, Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 30(6): 1–12]
- 刘池洋,赵红格,王锋,陈洪. 2005. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性. 地质学报, 79(6): 737–747. [Liu C Y, Zhao H G, Wang F, Chen H. 2005. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 737–747]
- 卢炳雄,文华国,淡永,陈洪,朱永才,于景维. 2018. 准噶尔盆地阜康凹陷阜东斜坡齐古组储层控制因素及有利区预测. 石油与天然气地质, 39(3): 549–557. [Lu B X, Wen H G, Dan Y, Chen H, Zhu Y C, Yu J W. 2018. Favorable accumulation region prediction and controlling factors of hydrocarbon accumulation of the Qigu Formation in the Fudong slope, Fukang sag, Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 549–557]
- 马超,吴孔友,裴仰文,李天然. 2019. 准噶尔盆地东部构造特征及演化定量分析. 地质力学学报, 25(3): 313–323. [Ma C, Wu K Y, Pei Y W, Li T R. 2019. Quantitative analysis of tectonic characteristics and evolution in the eastern Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 25(3): 313–323]
- 师志龙. 2002. 准噶尔盆地北部古近系挤压推覆构造与沉积耦合分析. 新疆地质, 20(2): 115–117. [Shi Z L. 2002. Compressional and thrust structures of the early Paleogene and their coupling sedimentary processes in the northern Junggar Basin of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 20(2): 115–117]
- 史燕青. 2020. 准噶尔盆地东南缘中二叠世—早三叠世构造—古地理演化研究. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Shi Y Q. 2020. Tectono-paleogeographic evolution during the Middle Permian–Early Triassic in the southeastern margin of the Junggar Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing)]
- 舒良树,周新民,邓平,余心起,王彬,祖辅平. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. 地质通报, 23(9): 876–884. [Shu L S, Zhou X M, Deng P, Yu X Q, Wang B, Zu F P. 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 876–884]
- 孙自明,沈杰. 2014. 新疆博格达推覆构造及其与油气的关系. 石油实验地质, 36(4): 429–434, 458. [Sun Z M, Shen J. 2014. Bogda nappe structure and its relations to hydrocarbon in Xinjiang. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(4): 429–434, 458]
- 唐勇,纪杰,郭文建,陈洪,李彦颖,董方. 2022a. 准噶尔盆地阜康凹陷东部中/上二叠统不整合结构特征及控藏作用. 石油地球物理勘探, 57(5): 1138–1147, 1005. [Tang Y, Ji J, Guo W J, Chen H, Li Y Y, Dong F. 2022a. Characteristics and reservoir-control effect of Upper/Middle Permian unconformity structures in the east of Fukang sag, Junggar Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 57(5): 1138–1147, 1005]
- 唐勇,宋永,何文军,赵龙,杨海波,赵长永,郑孟林,孙帅,费李莹. 2022b. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律. 石油与天然气地质, 43(1): 132–148. [Tang Y, Song Y, He W J, Zhao L, Yang H B, Zhao C Y, Zheng M L, Sun S, Fei L Y. 2022b. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(1): 132–148]
- 王家林,吴朝东,朱文,李壮,吴峻,陈榕,王军. 2016. 准噶尔盆地南缘二叠纪—三叠纪构造—沉积环境与原型盆地演化. 古地理学报, 18(4): 643–660. [Wang J L, Wu C D, Zhu W, Li Z, Wu J, Chen R, Wang J. 2016. Tectonic-depositional environment and prototype basin evolution of the Permian–Triassic in southern Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 643–660]
- 吴晓智,周路,杨迪生,齐雪峰,李伯华. 2012. 准噶尔盆地北三台凸起构造演化与油气成藏. 地质科学, 47(3): 653–668. [Wu X Z, Zhou L, Yang D S, Qi X F, Li B H. 2012. Structure evolution and hydrocarbon accumulation the Beisantai uplift in Junggar Basin. *Chinese Journal of Geology*, 47(3): 653–668]
- 杨庚,钱祥麟. 1995. 中新生代天山板内造山带隆升证据: 锆石、磷灰石裂变径迹年龄测定. 北京大学学报(自然科学版), 31(4): 473–478. [Yang G, Qian X L. 1995. Mesozoic-Cenozoic uplift of the Tian Shan intraplate orogenic belt evidence from zircon and apatite fission track dating. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 31(4): 473–478]
- 易泽军,李涤,连奕驰. 2018. 克拉美丽山南缘西段盆山耦合机制. 地质科学, 53(1): 169–184. [Yi Z J, Li D, Lian Y C. 2018. Basin-mountain coupling model of the southern margin of the weastern part of the Karamaili Mountains. *Chinese Journal of Geology*, 53(1): 169–184]
- 殷树铮,何登发,郭文建. 2024. 准噶尔盆地阜康凹陷二叠纪盆地属性与构造—沉积演化. 地质学报, 98(12): 3647–3661. [Yin S Z, He D F, Guo W J. 2024. The attribute and tectono-sedimentary evolution of the Fukang sag, Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 98(12): 3647–3661]
- 殷树铮,何登发,付国斌,郭文建. 2026. 博格达地区二叠纪原型盆地沉积充填与演化. 石油与天然气地质, 47(1): 124–142. [Yin S Z, He D F, Fu G B, Guo W J. 2026. Sedimentary filling and evolution of the Permian prototype basin in Bogda area, China. *Oil & Gas Geology*, 47(1): 124–142]
- 于福生,李国志,杨光达,马宝军,陈书平. 2009. 准噶尔盆地南缘褶皱—冲断带变形特征及成因机制模拟. 大地构造与成矿学, 33(3): 386–395. [Yu F S, Li G Z, Yang G D, Ma B J, Chen S P. 2009. Deformation feature and genesis simulation of fold-and-thrust

- belts in the southern margin, Junggar Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 386–395]
- 曾允孚, 覃建雄. 1999. 沉积学发展现状与前瞻. 成都理工大学学报(自然科学版), 26(1): 1–8. [Zeng Y F, Qin J X. 1999. Development and future of sedimentology. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 26(1): 1–8]
- 张朝军, 何登发, 吴晓智, 石昕, 罗建宁, 王宝瑜, 杨庚, 管树巍, 赵霞. 2006. 准噶尔多旋回叠合盆地的形成与演化. 中国石油勘探, 11(1): 47–58. [Zhang C J, He D F, Wu X Z, Shi X, Luo J N, Wang B Y, Yang G, Guan S W, Zhao X. 2006. Formation and evolution of multicycle superimposed basins in Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 11(1): 47–58]
- 张奎华, 曹忠祥, 王越, 张关龙, 薛雁, 王圣柱, 曲彦胜, 汪誉新. 2020. 博格达地区中二叠统芦草沟组沉积相及沉积演化. 油气地质与采收率, 27(4): 1–12. [Zhang K H, Cao Z X, Wang Y, Zhang G L, Xue Y, Wang S Z, Qu Y S, Wang Y X. 2020. Sedimentary facies and evolution of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 27(4): 1–12]
- 张磊, 何登发, 易泽军, 李涤. 2020. 克拉美丽山与大井坳陷的构造关系: 兼论石炭纪构造-沉积格局. 石油勘探与开发, 47(1): 29–44. [Zhang L, He D F, Yi Z J, Li D. 2020. Tectonic relationship between the Kelameili range and the Dajing depression: insights into the Carboniferous tectonic-sedimentary framework. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1): 29–44]
- 张元元, 曾宇轲, 唐文斌. 2021. 准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地分析. 石油科学通报, 6(3): 333–343. [Zhang Y Y, Zeng Y K, Tang W B. 2021. Permian attributes and tectonic evolution of the west Junggar Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 6(3): 333–343]
- 甄宇, 陈旋, 焦立新, 李新宁, 周志超, 刘文辉, 殷树铮, 李涤, 苟红光, 李成明, 何登发. 2024. 东疆地区石炭纪—二叠纪构造古地理与原型盆地演化. 古地理学报, 26(1): 78–99. [Zhen Y, Chen X, Jiao L X, Li X N, Zhou Z C, Liu W H, Yin S Z, Li D, Gou H G, Li C M, He D F. 2024. Carboniferous-Permian tectonopaleogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 78–99]
- 郑孟林, 田爱军, 杨彤远, 何文军, 陈磊, 吴海生, 丁靖. 2018. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集. 石油与天然气地质, 39(5): 907–917. [Zheng M L, Tian A J, Yang T Y, He W J, Chen L, Wu H S, Ding J. 2018. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 907–917]
- 支东明, 谢安, 杨帆, 马强, 何昌松, 苟红光. 2024. 准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景. 地质力学学报, 30(5): 781–794. [Zhi D M, Xie A, Yang F, Ma Q, He C S, Gou H G. 2024. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the eastern Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 30(5): 781–794]
- 朱文斌, 舒良树, 万景林, 孙岩, 王锋, 赵忠岩. 2006. 新疆博格达—哈尔里克山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据. 地质学报, 80(1): 16–22. [Zhu W B, Shu L S, Wan J L, Sun Y, Wang F, Zhao Z Y. 2006. Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang since the Cretaceous. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 16–22]
- Carroll A R, Liang Y H, Graham S A, Xiao X C, Hendrix M S, Chu J C, McKnight C L. 1990. Junggar Basin, northwest China: trapped Late Paleozoic ocean. *Tectonophysics*, 181: 1–14.
- Carroll A R, Graham S A, Smith M E. 2010. Walled sedimentary basins of China. *Basin Research*, 22(2): 17–32.
- Crook K A W. 2000. Sedimentology and sedimentary basins: from turbulence to tectonics. *Sedimentary Geology*, 137(3): 245–246.
- Gawthorpe R L, Leeder M R. 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12: 195–218.
- Li D, He D F, Tang Y. 2016. Reconstructing multiple arc-basin systems in the Altai-Junggar area (NW China): implications for the architecture and evolution of the western Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121: 84–107.
- Liu D D, Fan Q Q, Zhang C, Gao Y, Du W, Song Y, Zhang Z Y, Luo Q, Jiang Z X, Huang Z X. 2022. Paleoenvironment evolution of the Permian Lucaogou Formation in the southern Junggar Basin, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 603: 111198.
- Shi Y Q, Ji H C, Yu J W, Xiang P F, Yang Z B, Liu D D. 2020. Provenance and sedimentary evolution from the Middle Permian to Early Triassic around the Bogda Mountain, NW China: a tectonic inversion responding to the consolidation of Pangea. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104169.
- Tang J Y, He D F, Li D, Ma D L. 2015. Large-scale thrusting at the northern Junggar Basin since Cretaceous and its implications for the rejuvenation of the Central Asian Orogenic Belt. *Geoscience Frontiers*, 6(2): 227–246.
- Wang J, Cao Y C, Wang X T, Liu K Y, Wang Z K, Xu Q S. 2018a. Sedimentological constraints on the initial uplift of the West Bogda Mountains in Mid-Permian. *Scientific Reports*, 8(1): 1453.
- Wang J L, Wu C D, Li Z, Zhu W, Zhou T Q, Wu J, Wang J. 2018b. The tectonic evolution of the Bogda region from Late Carboniferous to Triassic time: evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and sandstone petrography. *Geological Magazine*, 155: 1063–1088.
- Zhao R, Zhang J Y, Zhou C M, Zhang Z J, Chen S, Stockli D F, Olariu C, Steel R, Wang H. 2020. Tectonic evolution of Tianshan-Bogda-Kelameili mountains, clastic wedge basin infill and chronostratigraphic divisions in the source-to-sink systems of Permian-Jurassic, southern Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104200.

(责任编辑 张西娟)