

鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段反转构造 及其对乌拉力克组页岩发育的控制*

李晨曦¹ 李 斐^{1,2} 张 雷^{1,2} 徐 敏¹ 黄 诚¹
刘佳乐¹ 张建伍^{1,2} 陈 石^{3,4} 魏嘉怡^{1,2}

1 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

2 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018

3 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

4 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘 要 反转构造是一种重要的叠加构造, 对含油气盆地中油气圈闭的发育具有重要指示意义。为明确鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段银洞子地区反转构造特征, 进一步探讨其对乌拉力克组页岩分布的控制作用, 首先依据二维格架大剖面及三维连片地震资料, 识别反转构造典型特征, 然后采用平衡剖面方法和离散元数值模拟技术对银洞子地区典型地震剖面做演化分析, 厘定反转构造演化的期次、过程, 最后利用三维地震资料恢复乌拉力克组沉积末期古地貌, 并利用地震速度-岩性分析模型预测乌拉力克组页岩厚度, 深入探讨构造反转对乌拉力克组页岩发育的控制。研究表明: (1) 银洞子地区发育典型正反转构造, 乌拉力克组沉积早期该区整体以正断裂和负向构造单元发育为特征, 二叠纪以后断裂性质由“正”转“逆”, 构造单元由“负”转“正”, 三叠纪以后挤压型构造继续叠加, 在剖面上形成“下洼上凸”的叠加构造样式; (2) 共发现 2 期构造正反转: 第 1 期为晚奥陶世—早石炭世的弱挤压反转, 是古秦岭洋俯冲机制转变引发的远程挤压响应, 其以区域性宽缓抬升和长期沉积间断为特征, 标志着该区构造体制从伸展向挤压转换的开端; 第 2 期为晚三叠世孕育、晚侏罗世—白垩纪的强烈逆冲反转, 其始于晚三叠世印支期华北与扬子板块碰撞所诱导的初始挤压, 并于晚侏罗世—白垩纪在太平洋板块俯冲的叠加作用下强烈活化, 完成了由先存张性断层向挤压构造体系的根本转型; (3) 乌拉力克组页岩的分布受 2 期反转构造作用控制: 第 1 期弧后拉张环境下的同沉积正断层控制了深水相厚层泥页岩的原始沉积, 微弱构造反转可能形成页岩包裹角砾灰岩的有利油气甜点区; 第 2 期强烈构造反转使先存断层转化为逆冲断层, 导致页岩分布位置向东推覆迁移至高部位; (4) 明确了惠沙断裂上盘以西、青平断裂下盘以东区域为乌拉力克组页岩最有利的沉积区域, 平面上有利沉积区带为鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段西北部的深洼陷。本研究提出了一种平衡剖面技术和数值模拟结合的反转构造演化分析思路, 不仅为鄂尔多斯盆地西缘南段古生界页岩油勘探指明了方向, 同时为类似的含油气盆地油区构造解析提供了方法论。

关键词 反转构造 页岩分布 乌拉力克组 西缘逆冲带 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 李晨曦, 男, 1994 年生, 博士、工程师, 长期从事油区构造解析、地震资料解释、石油地质综合研究。E-mail: 13299125257@163.com。

中图分类号: TE122.3 文献标志码: A

Controlling effect of tectonic inversion on shale distribution

* 国家科技重大专项(编号: 2025ZD1400202), 长庆油田公司关键核心技术攻关项目(编号: 2024D2ZZ01) 共同资助。[Co-funded by the National Major Science and Technology Project (No. 2025ZD1400202), and Key Core Technology Breakthrough Project of PetroChina Changqing Oilfield Company (No. 2024D2ZZ01)]

收稿日期: 2025-07-21 改回日期: 2025-11-03

of the Wulalike Formation in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt

LI Chenxi¹ LI Fei^{1,2} ZHANG Lei^{1,2} XU Min¹ HUANG Cheng¹

LIU Jiale¹ ZHANG Jianwu^{1,2} CHEN Shi^{3,4} WEI Jiayi^{1,2}

1 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

2 National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China

3 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

4 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract Inversion structures are significant superimposed structures that play an important indicative role in the development of hydrocarbon traps in petroliferous basins. To clarify the characteristics of inversion structures in the Yindongzi area, southern segment of the western Ordos Basin thrust belt, and further investigate their control on the distribution of the Wulalike Formation shale, this study first identifies typical features of inversion structures using 2D framework profiles and 3D seismic data. Then, balanced cross-section techniques and discrete element numerical simulation are applied to typical seismic profiles for evolutionary analysis, determining the stages and processes of inversion structure evolution. Finally, the paleogeomorphology at the end of Wulalike Formation deposition is restored using 3D seismic data, and the shale thickness of the Wulalike Formation is predicted based on a seismic velocity-lithology analysis model, enabling an in-depth discussion of tectonic inversion control on Wulalike Formation shale development. (1) Typical positive inversion structures developed in Yindongzi area. During the early depositional stage of the Wulalike Formation, the area was characterized by normal faults and negative structural elements. After the Permian, fault properties reversed from “normal” to “reverse”, and structural elements changed from “negative” to “positive”. Compressional structures continued to superimpose after the Triassic, forming a “lower depression and upper protrusion” structural style in profiles; (2) Two stages of positive tectonic inversion occurred in Yindongzi area: the first stage was a weak compressional inversion from the Late Ordovician to Early Carboniferous, a far-field compressional response triggered by the subduction mechanism transition of the Paleo-Qinling Ocean, characterized by regional broad uplift and long-term depositional hiatus, marking the beginning of the tectonic transition from extension to compression. The second stage was a strong thrust inversion, initiated in the Late Triassic and culminating in the Late Jurassic-Cretaceous. It began with initial compression induced by the North China-Yangtze block collision along the Qinling Belt during the Indosinian and was strongly activated during the Late Jurassic-Cretaceous by the superimposed effects of Pacific Plate subduction, completing the fundamental transformation from pre-existing extensional faults to a compressional structural system; (3) The distribution of Wulalike Formation shale is controlled by these two tectonic stages: The first stage, involving syn-sedimentary normal faults in a back-arc extensional setting, controlled the original deposition of thick deep-water shale. The weak tectonic inversion potentially formed favorable hydrocarbon “sweet spots” characterized by shale enclosing brecciated limestone. The second stage of strong tectonic inversion transformed pre-existing faults into thrust faults, causing the shale distribution to migrate eastward to higher structural positions; (4) The most favorable depositional area for Wulalike Formation shale is identified as the region west of the hanging wall of the Huishan Fault and east of the footwall of the Qingping Fault, with the planar favorable depositional zone located in the deep depression in the

northwestern part of southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt. This paper proposes an analytical approach combining balanced cross-section techniques and numerical simulation for studying inversion structure evolution, which not only guides the exploration of Paleozoic shale oil in the southern segment of the western Ordos Basin but also provides a methodology for structural analysis in similar petroliferous basins.

Key words inversion structures, shale distribution, Wulalike Formation, Western Ordos Basin Thrust Belt, Ordos Basin

About the first author LI Chenxi, born in 1994, Ph. D., is engaged in researches on structural analysis of petroliferous basins, seismic data interpretation and integrated studies of petroleum geology. E-mail: 13299125257@163.com.

0 引言

反转构造是地质体在不同的时期受到不同类型的应力作用后形成伸展和挤压构造叠加的复合构造类型 (Glennie and Boegner, 1981; Bally, 1983; Harding, 1985; Cooper and Williams, 1989; Ventisette *et al.*, 2006; Moustafa, 2014)。按照伸展和挤压构造形成的先后顺序一般可将反转构造划分为正反转构造和负反转构造, 其中正反转构造为先存伸展构造叠加后期挤压构造, 反之则为负反转构造 (Williams *et al.*, 1989; Mitra, 1993)。随着构造地质学和油气勘探技术的发展, 已在反转构造中发现了大量的油气资源, 揭示出反转构造与油气的形成、运聚和分布具有密切关系, 因此反转构造越来越受石油地质学家的关注 (胡望水, 1996; 赵永强, 2007; 李伟和高日胜, 2010; 曾维特等, 2012; 毕珉烽等, 2015; 陈念楠等, 2025)。

反转构造形成的最根本要素是构造应力性质的根本性改变, 中国南海陆缘和东部各油区在新生代受到印度、太平洋和欧亚板块相互作用的影响, 普遍发育反转构造 (龚再升和李思田, 2004; 李三忠等, 2013)。鄂尔多斯盆地西缘逆冲带地处华北板块西部, 是鄂尔多斯地块、阿拉善地块及祁连构造带的结合部位, 受到多期构造运动影响。早古生代, 古秦岭洋向华北板块之下俯冲, 导致鄂尔多斯盆地西南缘处于弧后拉张环境; 印支运动期间, 华南与华北板块相互碰撞, 盆地西南部受挤压作用开始褶皱隆起; 燕山运动期间, 受太平洋板块的远程效应和阿拉善板块向鄂尔多斯地块下部俯冲作用, 盆地西南部继续受挤压褶皱, 局部地区地层向东逆冲, 形成高角度推覆构造 (Liu, 1998; 陈青, 2015)。可见, 鄂尔多斯盆地西南缘的构造环境在

早古生代—中生代经历了“先张后压”的转变过程, 具备形成大范围正反转构造的有利条件。正反转构造可形成对油气运聚有利的圈闭条件: 先期伸展构造阶段, 富含有机质的细粒沉积物在低洼凹陷或裂陷中广覆式沉积, 加之埋深较大, 可形成优质烃源岩, 裂谷期沉积的渗透性地层和裂谷期后的致密岩层形成储盖组合; 构造反转之后, 形成的背斜在先期凹陷之上覆盖, 可作为油气储存的理想圈闭, 且在晚期靠近背斜的断层受到应力作用再次活化, 为油气运移提供通道和动力 (王燮培等, 1989; 陈昭年和陈发景, 1995; 汤良杰和金之钧, 2000; 褚庆忠, 2004)。

在鄂尔多斯盆地西南缘整体由主动大陆边缘转换为被动大陆边缘时, 由于俯冲的洋壳板块的后撤作用, 对上覆板块产生一个向海沟方向的拖拽力。这种拖拽力在弧后区域产生强烈的拉张应力, 导致西缘南段银洞子地区转变为弧后拉张环境, 地壳伸展、快速沉降, 形成深水缺氧环境, 沉积了乌拉力克组海相页岩, 岩性以黑色笔石页岩、碳质页岩和硅质岩为主, 夹薄层灰岩, 富含有机质, 是一套典型的深水、欠补偿、缺氧盆地相沉积 (董云鹏等, 2003; 邓军等, 2005)。印支和燕山 2 期构造挤压运动促使构造应力场发生根本性转变, 断裂逆冲, 地层抬升遭受剧烈剥蚀, 对页岩的保存极为不利 (刘池洋等, 2005)。因此, 厘清该地区反转构造样式, 明确构造反转发生的期次、成因机制及其对乌拉力克组页岩形成分布的控制作用, 具有重要研究意义。

鉴于此, 本研究首先通过对二维、三维地震资料精细解译, 厘定银洞子地区主要构造样式; 然后采用平衡剖面方法和离散元数值模拟技术对典型地

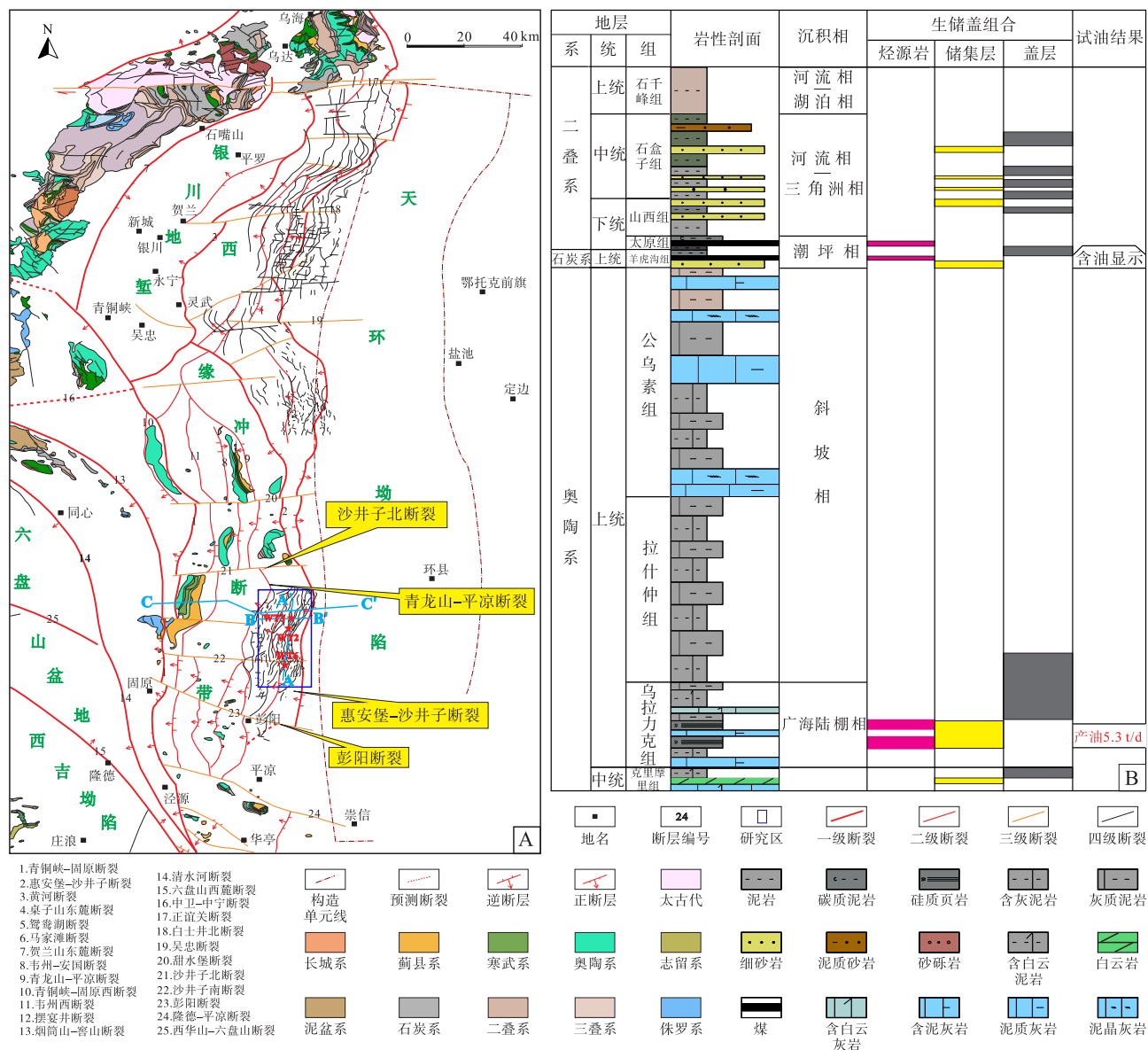
震剖面进行构造演化分析, 确定反转构造形成的期次、时间, 结合大地构造演化过程对其成因机理进行分析; 最后利用三维地震古地貌分析技术, 对乌拉力克组沉积期古地貌进行刻画, 在古地貌约束下使用地震速度-岩性分析技术预测了乌拉力克组页岩的分布, 为该区块下一步页岩油的勘探指明方向。

1 构造沉积背景

鄂尔多斯盆地西缘冲断带位于华北克拉通西部, 北邻阿拉善地块、西接河西走廊过渡带、南依

祁秦褶皱带, 发育南、北 2 套逆冲推覆构造系统, 走向依次为 NW 向和 NE 向, 分别受控于祁连地块和阿拉善地块。研究区位于冲断带南段逆冲推覆构造系, 整体由一系列中间开阔、两端收敛, 且向东北方向突出的弧形构造带组成, 以大型逆冲断层及逆冲席广泛发育为其典型特征(图 1-A)。自南西北东分布西华山—六盘山、清水河、烟筒山—窑山和青铜峡—固原断裂等, 断裂以 NW 向展布为主, 断面上陡下缓并逐渐向深层滑脱。

银洞子地区位于西缘冲断带南部惠安堡—沙井子断裂(惠沙断裂)以西、青龙山—平凉断裂



A—鄂尔多斯盆地西缘逆冲带构造纲要图; B—鄂尔多斯盆地西缘冲断带南段古生界地层综合柱状图

图 1 鄂尔多斯盆地西缘构造单元划分及古生界地层综合柱状图

Fig. 1 Structural division of Western Ordos Basin with the Palaeozoic comprehensive stratigraphic column

(青平断裂)以东、沙井子北断裂以南及彭阳断裂以北的区域内。区内整体由惠安堡—沙井子断裂和青龙山—平凉断裂中生代以来逆冲推覆所形成的逆冲席构成,呈向斜地形,以近 NE—SW 向展布的逆冲断裂为特征。钻井揭示乌拉力克组地层整体发育特征为东薄西厚、南薄北厚,厚度普遍为 10~150 m,局部可达 360 m 以上(魏嘉怡等, 2025)。

鄂尔多斯盆地西缘逆冲带早古生代以来属祁连海沉积域,并从海相沉积逐渐过渡为陆相沉积(高振中等, 1995; 贾振远等, 1997; 刘少峰等, 1997; 郭英海和刘焕杰, 1999)。加里东运动以来,鄂尔多斯盆地东部抬升,而西部发生裂陷,地形相对下降,水体持续加深并接受沉积,至上奥陶统下部乌拉力克组沉积时,在缺氧的环境中发育一套以灰黑色硅质页岩、含泥灰岩、深灰色灰质泥岩夹白云泥岩为主的海相地层沉积(图 1-B)。2022 年在该区完钻的 WT3 井乌拉力克组试油获 5.3 t/d 工业油流,这是首次在华北克拉通古生界发现油藏,证明乌拉力克组页岩油勘探具有广阔前景和巨大潜力。

2 反转构造特征及演化期次

2.1 反转构造样式地震解释

鄂尔多斯盆地西缘南段具备有反转构造形成的构造背景条件,但要厘定反转构造的发育特征,尚

需进一步结合三维地震资料精细解译。

通过典型过井地震剖面标定和解译(图 2)发现, WT6 和 WT3 井乌拉力克组钻遇的 F2 和 F6 断裂表现为逆冲断裂,但 F1、F3、F4 及 F5 断裂表现为断距较小的正断裂,说明乌拉力克组沉积早期可能存在过正断裂;同时在二叠系沉积以后断裂整体表现为逆冲性质,说明晚期挤压逆冲对早期的正断裂存在“改造”,使部分大断距的(同沉积)正断裂性质发生反转。为验证这一观点,利用地震层拉平技术将过 WT3 井的剖面石炭系底界拉平,可观察到拉平剖面上 WT3 井处的乌拉力克组底界并不是逆冲断裂,而表现为微弱的正断裂,说明该断裂后期发生性质反转(图 3)。另一方面,图 2 中的 F2 和 F3 断裂之间的区域,在乌拉力克组底界表现为洼陷,即负向构造单元,而二叠系底界以上转变为断背斜,即正向构造单元,这是典型的反转构造叠加样式;图 3 所示的 WT3 井处,石炭系底界拉平之后乌拉力克组底界表现为低洼构造,拉平之前表现为断背斜,揭示了该处构造在晚期发生反转。

从断裂性质和构造综合判断,乌拉力克组沉积早期该区整体以正断裂和负向构造单元发育为特征,二叠系沉积以后断裂性质由“正”转“逆”,构造单元由“负”转“正”,三叠纪以后挤压型构造继续叠加,在剖面上形成“下洼上凸”的叠加构造样式,为典型的正反转构造(图 2)。

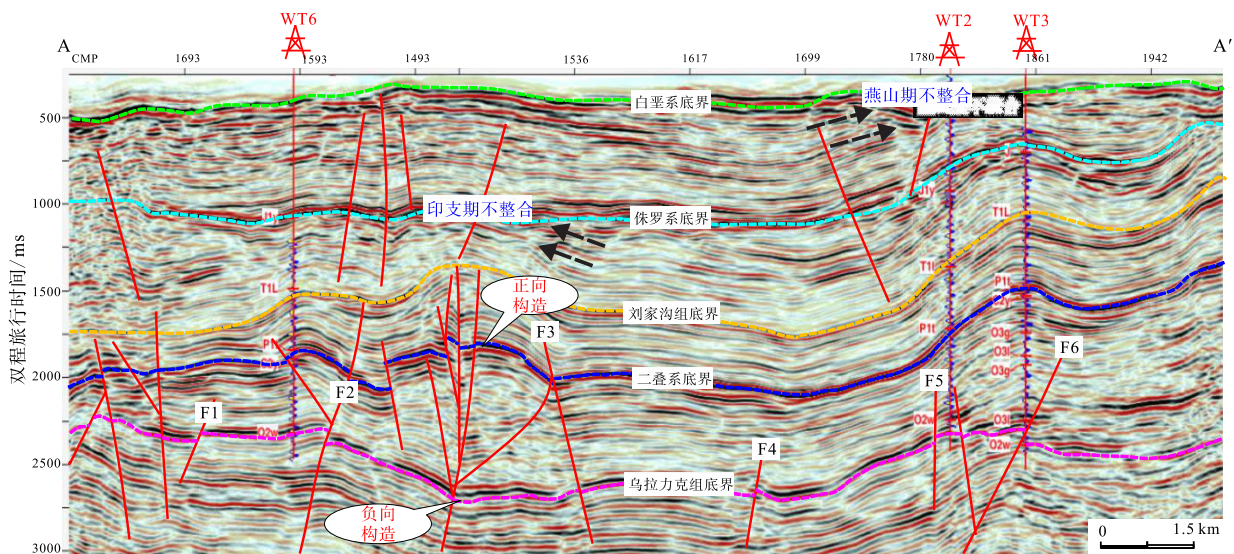


图 2 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段典型正反转构造样式地震解释(剖面位置见图 1-A)
Fig. 2 Seismic interpretation illustrating typical positive inversion structural styles in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt (profile location shown in Fig. 1-A)

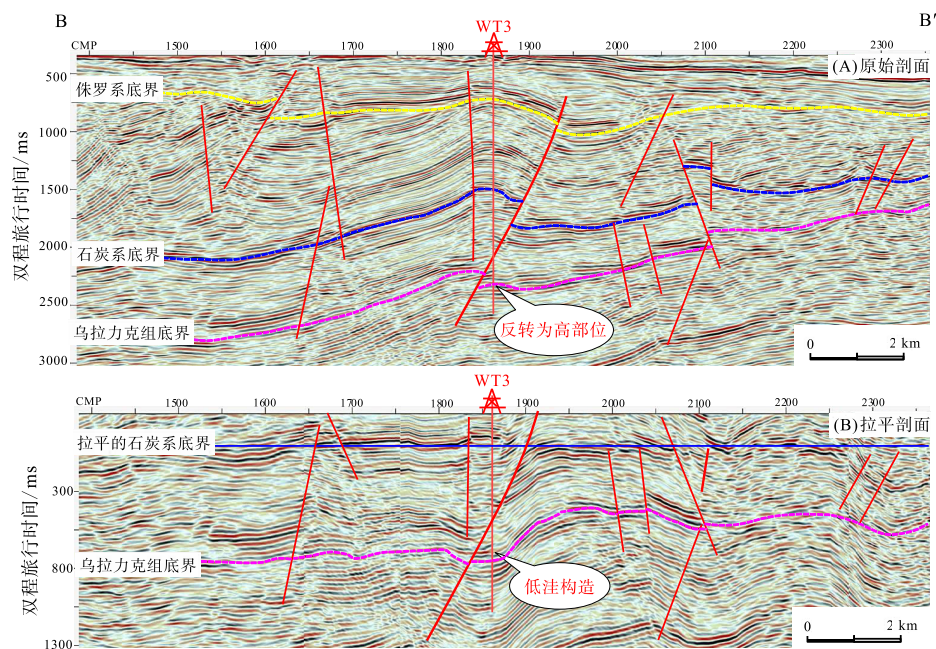


图 3 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段过 WT3 井地震解释剖面及拉平剖面 (剖面位置见图 1-A)

Fig. 3 Seismic interpretation illustrating typical positive inversion structural styles in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt (profile location shown Fig. 1-A)

2.2 反转构造演化期次分析

前人研究表明：鄂尔多斯盆地西缘南段主要发育高角度逆冲推覆构造系统（赵红格，2003）。本研究通过二维格架大剖面解译，发现盆地西缘南段自东向西发育惠安堡—沙井子断裂（惠沙断裂）、青龙山—平凉断裂（青平断裂）、韦州—安国断裂（韦安断裂）及青铜峡—固原断裂（青固断裂）。其中惠沙断裂和青平断裂所夹持的断块为沙井子逆冲席，青平断裂和韦安断裂夹持的断块为银洞子逆冲席。沙井子逆冲席的地层记录较为完整，WT2、WT3 和 WT6 钻井也证实了奥陶系为一良好的含油气层系，因此该逆冲席是近年来古生界油气勘探的热点（图 4）。

利用 2DMOVE 软件对大剖面 CC' 进行平衡剖面分析（图 5），将鄂尔多斯盆地西南缘整体构造演化分为 6 个阶段。（1）克拉通基底形成与被动陆缘阶段：中晚元古代，南部的秦岭洋广阔，鄂尔多斯西南缘处于被动大陆边缘环境，发育稳定的碳酸盐岩和碎屑岩台地沉积（如长城系、蓟县系、青白口系），此时南缘整体为一个相对稳定的伸展背景。（2）主动陆缘与弧后拉张阶段：中—晚奥陶世以来，古秦岭洋壳开始向华北克拉通之下俯冲，

在俯冲带的后方（弧后），地幔上涌导致地壳伸展，形成了弧后拉张盆地。（3）碰撞隆升与长期剥蚀阶段：晚奥陶世—早石炭世，古秦岭洋逐渐闭合，华北板块与扬子/秦岭微地块发生碰撞（加里东运动），应力场由拉张转为挤压，弧后盆地反转，整体隆升成陆，导致志留系、泥盆系和下石炭统普遍缺失，形成了奥陶系顶面与上石炭统之间的区域性平行不整合，这是一个约一亿年的漫长沉积间断和剥蚀期。（4）陆内拗陷与稳定沉积阶段：晚古生代—中三叠世，碰撞造山主幕结束后，区域进入陆内拗陷阶段，沉积了上石炭统—二叠系的海陆交互相含煤地层（本溪组/羊虎沟组、太原组、山西组）以及陆相碎屑岩（石盒子组、石千峰组），它们是重要的煤炭和天然气储集层。（5）强烈挤压与逆冲构造定型阶段：中生代以来，受太平洋板块向欧亚板块强烈俯冲（燕山运动）和特提斯构造域远程效应的共同影响，区域遭受强烈的近南北向挤压，早期（尤其是奥陶纪）的正断层发生剧烈构造反转，形成了盆地西缘宏伟的逆冲推覆构造带；此时，西南缘的古构造格局被强烈改造，最终定型。（6）伸展断陷与现代地貌形成阶段：新生代以来，太平洋俯冲带后撤，区域应力场转为伸展，在鄂尔多斯盆地周缘形成一系列地堑系，如

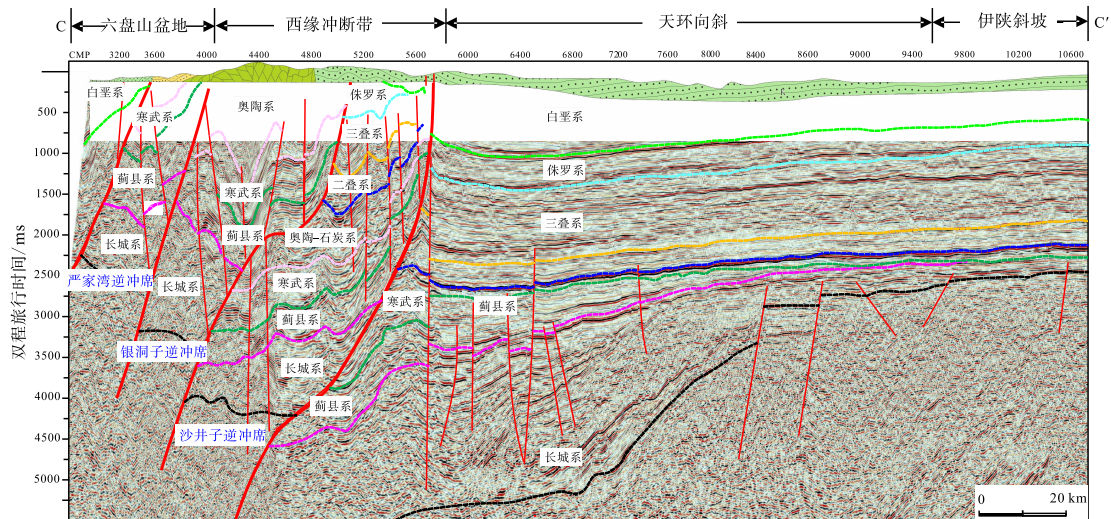


图 4 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段典型地震解释大剖面 (剖面位置见图 1-A)

Fig. 4 Representative regional seismic profile showing interpreted structures in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt (profile location shown in Fig. 1-A)

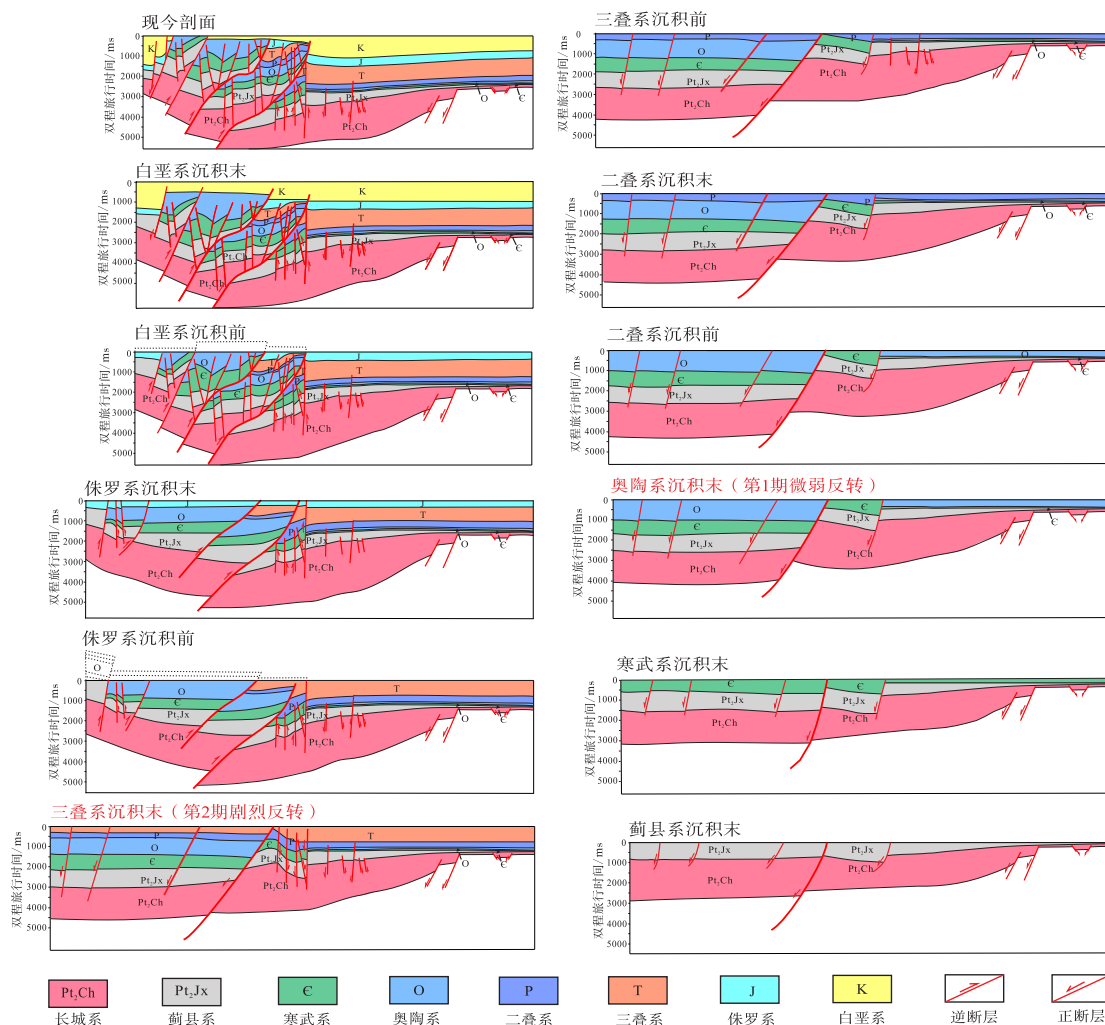


图 5 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段典型构造演化剖面

Fig. 5 Evolutionary cross-section illustrating tectonic development in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt

西缘的银川地堑,南缘的渭河地堑。鄂尔多斯盆地本部整体抬升,成为稳定的黄土高原组成部分,西南缘作为高原边坡,现代地貌基本形成。

从构造演化分析,鄂尔多斯盆地西南缘共发生 2 期构造正反转,即晚奥陶世一早石炭世的弱反转和晚三叠世以后的强反转阶段。惠沙断裂在晚奥陶世以前表现为同沉积正断裂,下降盘沉积巨厚的中新元古界—奥陶系,而在晚奥陶世一早石炭世期间构造背景由“张”转为“挤”,惠沙断裂有微弱的反转,但不足以补偿正断距。晚三叠世以后,印支运动是西南缘由伸展转换为挤压的“预热”和“序幕”,即第 2 期构造反转的孕育阶段(刘池洋等, 2005);晚侏罗世—白垩纪的强烈挤压促使该次构造反转彻底完成,惠沙断裂此时已经被改造为一个高角度的、强烈逆冲推覆的断裂(图 5)。

3 反转构造成因数值模拟

3.1 构造反转演化数值模拟

离散元数值模拟通过将地质体简化为一系列可独立运动的颗粒或块体,基于牛顿运动定律和本构关系,定量模拟构造变形过程。数值模拟在构造分析中的核心作用在于量化揭示构造形成的动力学机制,如断层带的演化、褶皱作用、裂缝网络生成及应力—应变分布,从而将宏观构造与微观机制动态关联。近年来该技术正从二维、小尺度、单一过程向三维、大尺度、多场耦合(热—流—力—化)及与连续介质方法(有限元)杂交的方向迈进,并与地震解译、物理模拟和野外露头数据深度融合,成为验证构造假说、预测深部构造和非常规储层裂缝的关键工具(Cundall and Strack, 1979; Dean *et al.*, 2013; 李长圣等, 2022)。

在盆地分析及构造演化的数值模拟方面,国内外众多学者也做了大量创新工作。例如,周易等(2019)利用数值模拟解析裂陷盆地演化过程中分层伸展叠加变形的动力学演化过程,吴珍云等(2019)分析区域应力场作用下反转构造特性及正断层反转控震机制,刘源和 Heinz (2019)利用数值模拟揭示纯走滑拉分盆地发育过程中的断裂扩展和连接过程,李江海等(2020)、徐雯峤等(2020)探讨库车前陆冲断带西部盐构造形成的控制因素及其形成机理。然而,利用数值模拟对鄂尔

多斯盆地西缘冲断带进行系统的构造演化分析却鲜有报道,因此本研究以地震解析及平衡剖面分析结果为基础,开展构造演化数值模拟,将反转构造形成的重要阶段恢复出来,剖析鄂尔多斯盆地西南缘银洞子地区(惠沙断裂与青平断裂之间的区域)构造反转的成因机制。

数值模拟结果表明:中奥陶世,该地区在前寒武系的基础上继承性发育裂陷,构造活动微弱,在伸展环境下发育西倾东断的同沉积正断裂(惠沙断裂),奥陶系发生差异沉积,惠沙断裂以西下降盘沉积厚度大,以东上升盘沉积较薄;晚奥陶世一早石炭世,进入约一亿年的抬升剥蚀和沉积间断期,惠沙断裂上升盘以东的地区奥陶系抬升较高,剥蚀殆尽,但断裂下降盘地层抬升有限,不足以抵消正断距效应,地层得以保存;晚石炭世—二叠纪,该区进入填平补齐阶段,沉积了海陆交互相地层;晚三叠世,进入挤压剥蚀期,惠沙断裂开始孕育反转,正断距在地层的抬升过程中“减小”,惠沙断裂的推覆作用导致断弯褶皱形成;晚侏罗世,进入强挤压阶段,2 条主干断层发生强烈逆冲推覆,顶部发育明显的断背斜,其上沉积的侏罗系与下伏三叠系呈角度不整合接触,这在地震解译剖面上清晰可见(图 2 燕山期角度不整合)。随着挤压作用的持续进行,背斜形态愈加明显,断裂上盘逆冲抬升更加强烈,主干断裂夹持的断块形成多个逆冲席(图 6)。

数值模拟的结果验证了西南缘银洞子地区存在 2 期构造正反转:第 1 期为晚奥陶世一早石炭世的弱挤压反转,导致惠沙断裂以东的奥陶系剥蚀殆尽,而西侧奥陶系保存较为完整;第 2 期为晚三叠世孕育、晚侏罗以来的强烈逆冲反转,导致印支、燕山 2 期不整合形成,挤压褶皱发育,奥陶系被抬升至高部位但未发生剥蚀。

3.2 反转构造成因机制分析

鄂尔多斯盆地西南缘在晚奥陶世一早石炭世发生第 1 期构造正反转,本次反转较为微弱,是一种“远程、初始”的挤压效应,其核心成因是古秦岭洋壳俯冲机制的转变。在中—晚奥陶世,该区处于弧后拉张环境;而至晚奥陶世,随着古秦岭洋盆的收缩,俯冲作用可能从高角度、后退式转变为低角度或停滞式,导致弧后区域由拉张状态转为挤压松弛。这种挤压并非源自直接的陆—陆碰撞,而是俯

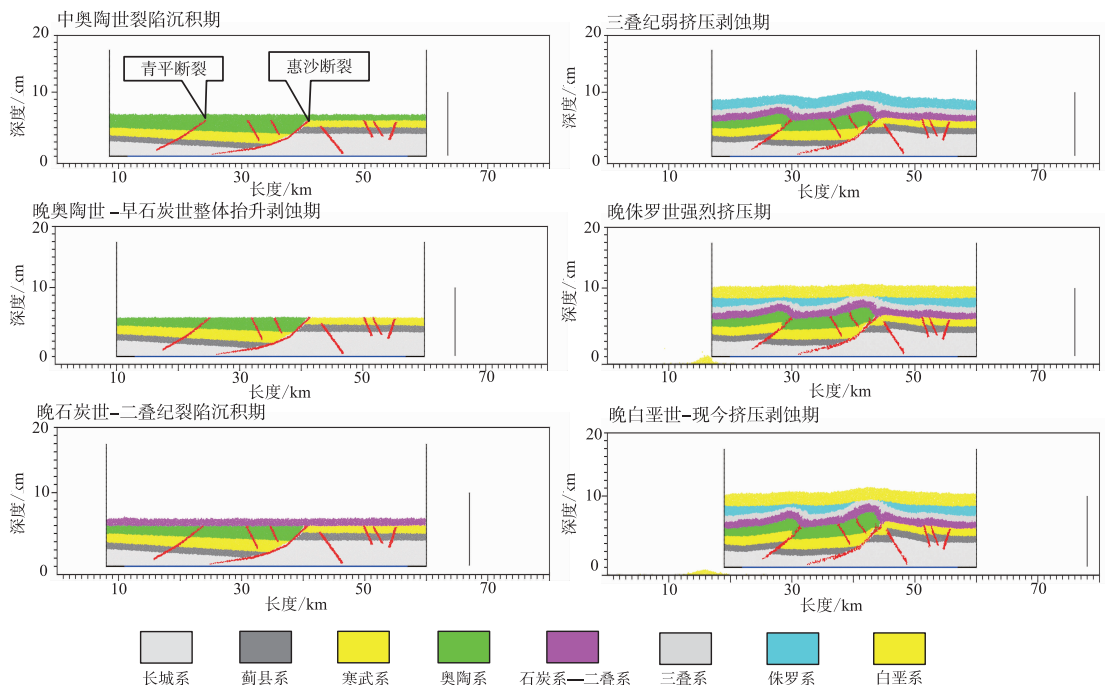


图 6 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段典型剖面构造演化数值模拟

Fig. 6 Numerical modeling of tectonic evolution for a representative cross-section in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt

冲体系动力学调整的远程响应, 因此应力相对较弱。其直接表现是弧后拉张盆地的整体性、宽缓抬升, 而非产生大规模的逆冲断层与剧烈褶皱。这次抬升导致了志留系、泥盆系和下石炭统的普遍缺失, 形成了奥陶系与上石炭统之间的区域性平行不整合, 标志着该区从伸展背景向挤压背景转变的开端, 为后续中生代强烈的构造反转奠定了基础(图 6)。值得注意的是, 该次构造反转致使惠沙断裂东西两侧奥陶系不均衡沉积和剥蚀, 银洞子地区整体位于惠沙断裂以西、青平断裂以东的沙井子逆冲席, 该范围内奥陶系保存较好, 因此 WT3 井在乌拉力克组试油获 5.3 t/d。

鄂尔多斯盆地西南缘在晚三叠世末(印支期)和晚侏罗世—白垩纪(燕山期)发生第 2 期构造正反转, 分为反转孕育阶段和强烈反转阶段。孕育阶段在晚三叠世, 该时期随着扬子板块与华北板块沿秦岭带发生陆—陆碰撞(印支运动主幕), 产生了强烈的近南北向挤压应力。应力场向北传递至鄂尔多斯盆地西南缘, 使得在早古生代弧后拉张盆地时期形成的先存正断层发生构造反转, 早期控盆的张性断层转变为挤压环境下的逆冲断层(刘池洋等, 2005; 任战利等, 2006)。此次反转主要表现

为区域性宽缓隆升和晚三叠世与早侏罗世地层间的沉积间断, 奠定了盆地西缘构造格架的雏形。晚侏罗世以来, 太平洋板块(特别是伊那那岐板块)向欧亚板块之下发生高速、低角度的俯冲, 产生了强大的北西—南东向区域挤压应力。此应力场与持续活动的秦岭带远程效应叠加, 共同作用于鄂尔多斯西南缘(Zhu *et al.*, 2011)。强烈的挤压使得先存断层(包括印支期已经弱反转的断层)剧烈复活, 形成了大规模的逆冲推覆构造与相关褶皱, 构成了现今地质图上的主体构造形迹, 并造成了侏罗系与白垩系之间的显著不整合, 至此构造反转完成。

4 反转构造控制下的页岩分布模式

4.1 构造反转前的古地貌恢复

受构造运动、地层剥蚀等影响, 现今地貌不能完全代表沉积期古地貌。尤其对于页岩的沉积而言, 沉积期古地貌往往控制着页岩的沉积, 对页岩分布模式起到决定作用。因此, 恢复乌拉力克组沉积期的古地貌对于分析其沉积规律至关重要。

如图 7 所示, 构造反转前的古地貌刻画通过

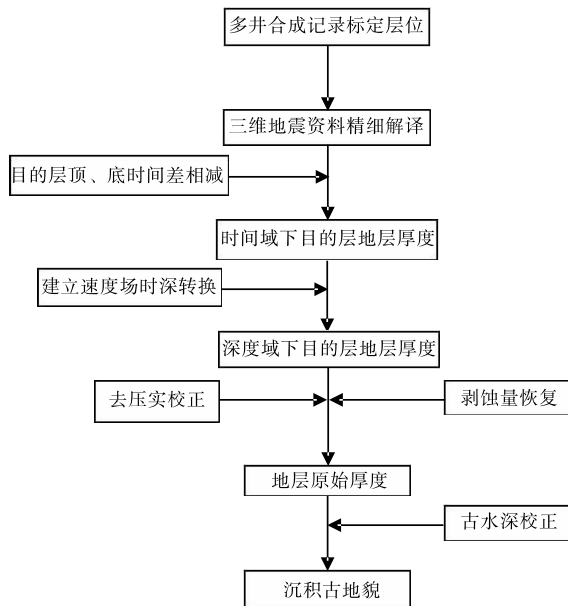


图 7 构造反转前古地貌恢复流程

Fig. 7 Process of palaeogeomorphic reconstruction before tectonic inversion

以下技术流程完成：首先通过井震标定，精细解释层位和断裂系统，然后建立精确速度场进行时深转换，获得深度域下的目的层厚度，再进行去压实校正、剥蚀量恢复，计算出地层原始厚度，最后进行古水深校正，得到沉积期古地貌图。

乌拉力克组上覆地层为巨厚的拉什仲组泥岩夹灰岩，直到晚奥陶世—早石炭世研究区才抬升剥蚀，因此笔者认为乌拉力克组沉积末期不存在剥蚀，只需进行去压实校正和古水深校正就可得到乌拉力克组沉积期的古地貌。

去压实校正是古地貌恢复和盆地模拟中最基础、最关键的步骤之一。地层被上覆岩石压实，孔隙度变低，厚度变小。去压实校正就是通过数学模型，逆向恢复地层在沉积末期未被压实时的原始厚度和孔隙度。具体过程为：在 Geoscope 软件中输入当前地层深度、厚度、岩性，以及不同岩性（泥岩、砂岩等）的初始孔隙度和压实系数；从顶到底逐层剥离，对于其下每一层，根据它被移除后的新埋深，利用“孔隙度—深度”关系公式（Athy, 1930）计算出它在该古埋深下的原始孔隙度；根据“骨架体积不变”原则，利用新计算的孔隙度，反推出该地层在过去的原始厚度；重复此过程，直到所有目标地层都被恢复，最终得到古地貌面。整个去压实校正中最关键的参数就是地表孔

隙度和压实系数，根据前人在鄂尔多斯盆地西缘的热演化与古地温研究领域的成果，笔者采纳的参数为：地表泥岩孔隙度 $\Phi_0 = 65\%$ ，压实系数 $c = 0.39$ ；地表砂岩孔隙度 $\Phi_0 = 49\%$ ，压实系数 $c = 0.27$ （Sclater and Christie, 1980；任战利等，2006）。

古水深校正对于准确恢复古地貌具有重要影响。根据前人对岩性特征、沉积构造以及古生物资料的综合分析，笔者认为乌拉力克组页岩中笔石、放射虫和海绵骨针三者共存，指示生物相带水深在 200~600 m 之间（张维，1991；傅力浦等，1993）。

根据以上的技术流程及约束条件，刻画出乌拉力克组现今地貌（图 8-A）及其沉积末期的古地貌（图 8-B）。对比古今地貌，WT3 井在现今表现为局部隆起区，但在乌拉力克组沉积末期却是局部洼陷，这从钻井资料方面印证了乌拉力克组古地貌存在构造反转。总体来看，乌拉力克组沉积时期南高北低，北部表现为“两洼夹一隆”，自南东向北西洼陷深度加大，水体加深。现今地貌表现为中部突起，南北为洼陷，且南北洼陷被中部的凹槽所沟通。

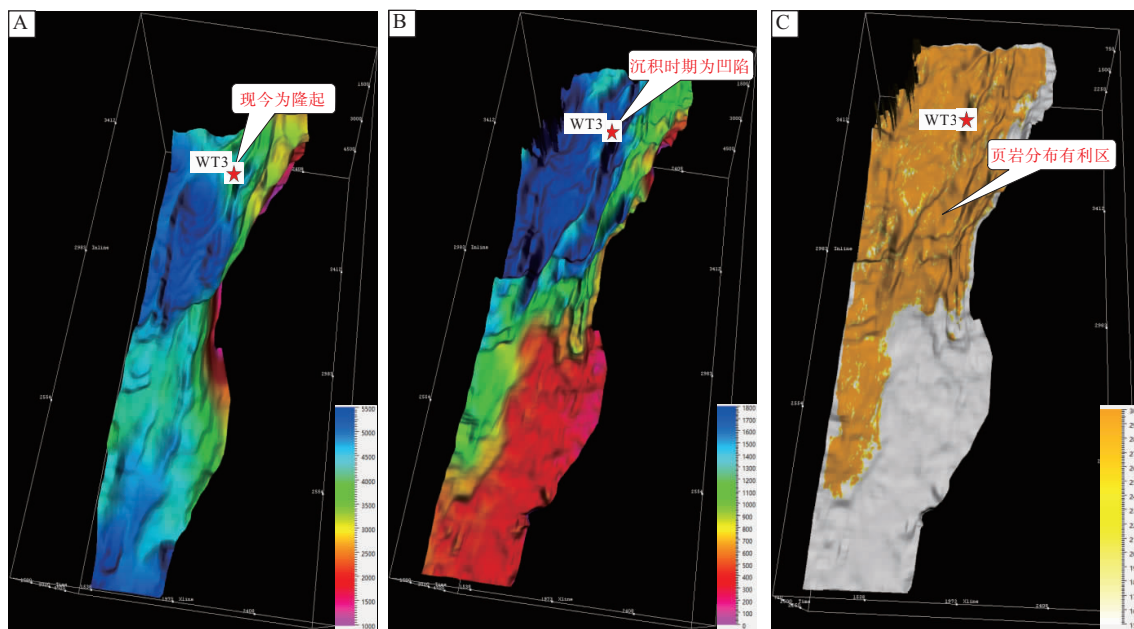
乌拉力克组沉积期受古秦岭洋壳的俯冲作用，南部抬升，表现为隆起地貌，而向北逐渐转化为局部拉张环境，水深北深南浅，北部为主要沉积中心。结合乌拉力克组沉积末期古地貌与页岩分布叠合图（图 8-C），可明确页岩主要发育在银洞子地区的北部深洼陷中，向南逐渐不发育，这与古地貌所呈现的沉积中心是基本吻合的。

4.2 乌拉力克组页岩厚度预测

从岩性组合特征来看，乌拉力克组岩性构成较为复杂，非纯泥页岩沉积，而是夹杂着灰岩、云岩等，因此准确预测其厚度较难。本研究通过计算泥岩指数（泥岩在地层总厚度中所占百分比），进而以地层厚度来估算泥页岩总厚度。地层中泥质地层百分含量与地层的速度之间可以用岩石体积物理模型来表示（Li *et al.*, 2022）：

$$\frac{1}{v'_{\text{int}}} = \frac{P_m}{v_m} + \frac{1 + P_m}{v_s} \quad (1)$$

其中： v'_{int} 为层速度， v_s 和 v_m 分别代表纯非泥岩和纯泥岩的速度，它们受埋深的控制，可从压实模型中获取， P_m 为泥岩百分比，亦被称为泥岩指数。



A—乌拉力克组现今地貌；B—乌拉力克组沉积末期古地貌；C—乌拉力克组沉积末期古地貌与页岩分布叠合图

图 8 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段乌拉力克组古今地貌对比及页岩分布

Fig. 8 Palaeo-present geomorphic comparison and shale distribution of the Wulalike Formation in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt

目的层段泥岩总厚度可用地层厚度与泥岩指数的乘积得到：

$$H_m = P_m \cdot H \quad (2)$$

其中： H 为目的层段的地层总厚度，可由时深关系转化而来； P_m 为泥岩指数。

通过对银洞子地区钻井中不同岩性的测井速度进行分类统计，制作压实模型如图 9，分析可获取灰岩速度和纯泥页岩速度包络线，随着泥页岩含量的渐少，地层速度由 4000 m/s 逐渐增大至 6500 m/s。将压实模型所获取不同深度的纯泥页岩和灰岩包络速度、地震速度谱转换的层速度带入公式 (1)，可计算出泥岩指数，再乘以乌拉力克组地层总厚度预测出泥页岩总厚度如图 10-A。

4.3 构造反转控制的页岩分布

前文述及，乌拉力克组沉积时期的古水深为 200~600 m，说明页岩沉积厚度最大不能超过 600 m。从泥页岩预测结果来看，其厚度分布范围为 0~400 m，这与古水深范围是一致的。另一方面，乌拉力克组沉积期古构造小于 200 m 的即高于沉积基准面，因此将古构造 200 m 确定为泥页岩沉积的剥蚀界面（图 10-B）。

分析乌拉力克泥页岩分布图（图 10-A）和沉

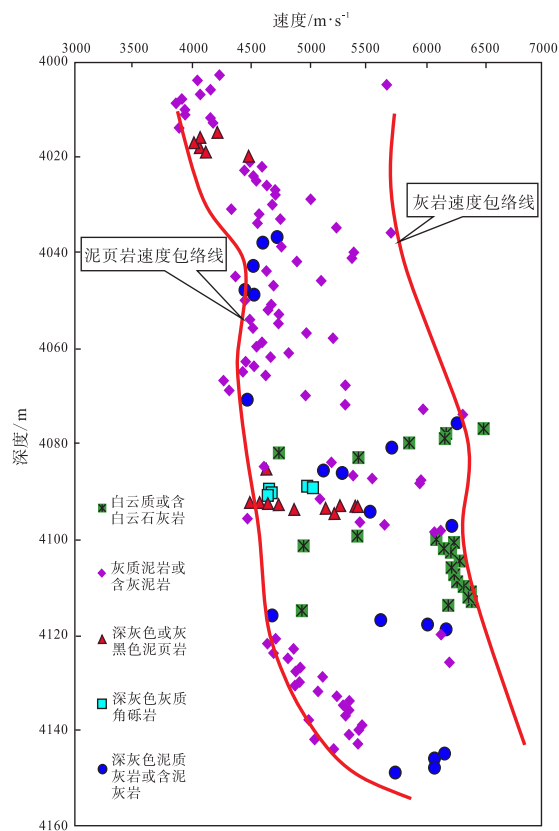
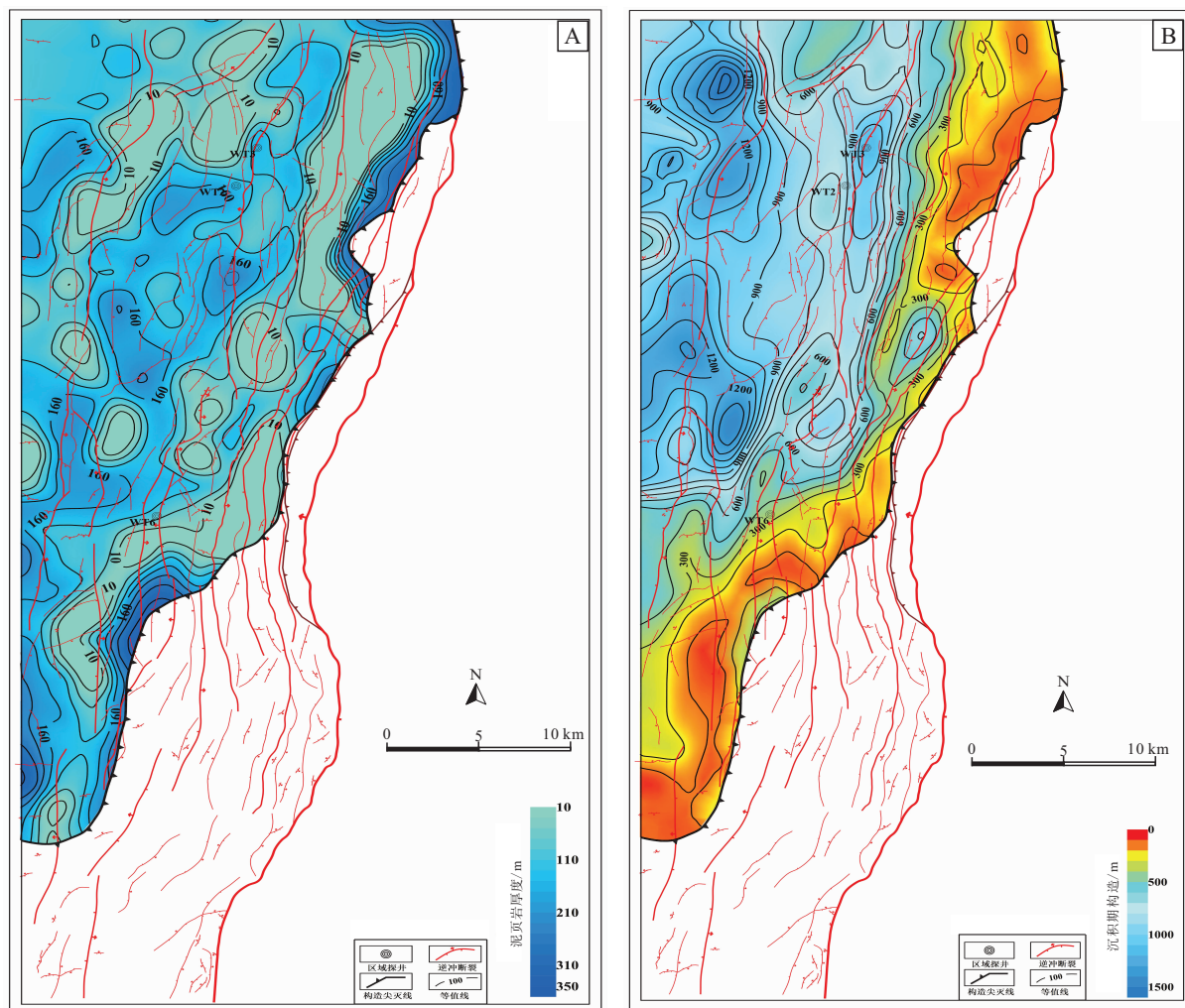


图 9 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段乌拉力克组压实模型

Fig. 9 Compaction model of the Wulalike Formation in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt



A—乌拉力克组泥页岩等厚图；B—乌拉力克组沉积末期构造图

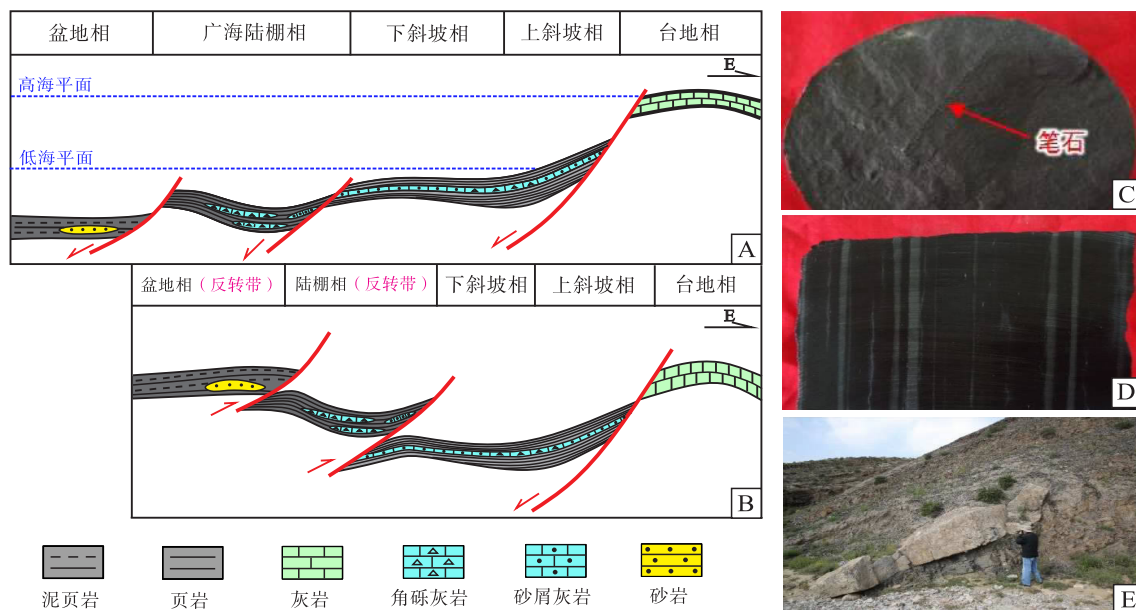
图 10 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段乌拉力克组古构造图及页岩等厚图

Fig. 10 Palaeotectonic map and shale isopach map of the Wulalike Formation in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt

积末期古构造图（图 10-B），发现在研究区北部 2 个古洼陷地带分布 150 m 以上的泥页岩，说明北部作为深水区，发育缺氧环境，有机质富集，是乌拉力克泥页岩沉积的主要有利区。注意到在构造剥蚀线附近也存在泥页岩厚值，但这并不代表这些地带存在较厚泥页岩，这是由于该处抬升较高，地震层速度较小，故而求取的泥质指数偏大，导致形成了泥页岩沉积厚值区的假象。

事实上，第 1 期构造反转主要控制着乌拉力克组页岩的沉积，而第 2 期构造反转改造了其空间分布，即乌拉力克泥页岩的分布位置发生了“迁移”。乌拉力克组的沉积时代跨越了中奥陶世晚期至晚奥陶世早期，该时期发生了一次重大的海侵和构造沉降事件，银洞子地区整体为弧后拉张环境，

惠沙断裂以西发育多条同沉积正断裂，控制着断裂下降盘沉积深水盆地和陆棚相的厚层泥页岩（图 11-A，11-B），随着空间位置向斜坡和台地过渡，岩性由灰黑色页岩向灰、云岩转变（图 11-C 为 WT3 井 4106.13 m 的乌拉力克组灰黑色硅质页岩，笔石发育，反映深水沉积环境；图 11-D 为 WT3 井 4092.89 m 的乌拉力克组灰黑色页岩），泥页岩厚度减小。由于第 1 期构造反转相对微弱，惠沙断裂在此时仍以正断裂性质为主，因此乌拉力克组页岩主要分布在惠沙断裂下降盘及以西区域。但在沉积末期，由于水体西深东浅，坡度大，东侧浅海台地相灰岩易垮塌，在上斜坡和下斜坡的过渡部位堆积成透镜状角砾灰岩沉积（图 11-E 中在一线天露头可观察到透镜状的角砾灰岩沉积），致使泥页岩夹



A—裂陷沉积期（乌拉力克组沉积期）页岩分布模式；B—构造反转期页岩分布模式；C—WT3 井，4106.13 m，乌拉力克组，灰黑色硅质页岩，笔石发育；D—WT3 井，4092.89 m，乌拉力克组，灰黑色页岩；E—一线天，乌拉力克组，透镜状角砾灰岩

图 11 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段乌拉力克组沉积期到反转期页岩分布规律及岩心露头特征

Fig. 11 Distribution patterns and core and outcrop characteristics of shale from the depositional period of Wulalike Formation to tectonic inversion period in southern segment of Western Ordos Basin Thrust Belt

杂着角砾灰岩，这种页岩包裹角砾灰岩的岩性组合往往是有利的油气藏甜点区。

在第 2 期强烈的构造反转发生后，包括惠沙断裂在内的多条同沉积正断裂在 NE 向的挤压作用下，断裂下降盘地层依次沿断面向东逆冲推覆，断裂性质彻底转变为逆断裂，使沉积期的盆地相和陆棚相地层转换为断裂上升盘，乌拉力克泥页岩分布位置也随之调整至高部位（图 11-B）。后期在乌拉力克组地层之上沉积了巨厚的拉什仲组泥灰岩地层，使乌拉力克组泥页岩免遭剥蚀。但构造抬升将乌拉力克组地层埋深变浅，其地层温度也降低，必然导致乌拉力克组泥页岩的热演化中断（Li *et al.*, 2024）。从目前测试数据来看，埋深超过 4000 m 的乌拉力克组页岩的热成熟度不超过 1.2%，足以印证这一点。

综合古地貌恢复和构造演化分析，惠沙断裂上盘以西、青平断裂下盘以东区域为乌拉力克泥页岩最有利沉积区域，平面上有利沉积区带为鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段西北部的深洼陷。

5 结论

1) 发现鄂尔多斯盆地西缘银洞子地区发育典

型正反转构造，乌拉力克组沉积早期该区整体以正断裂和负向构造单元发育为特征，二叠纪后断裂性质由“正”转“逆”，构造单元由“负”转“正”，三叠纪后挤压型构造继续叠加，在剖面上形成“下洼上凸”的叠加构造样式。

2) 认为银洞子地区存在 2 期构造正反转：第 1 期为晚奥陶世—早石炭世的弱挤压反转，是古秦岭洋俯冲机制转变引发的远程挤压响应，其以区域性宽缓抬升和长期沉积间断为特征，标志着该区构造体制从伸展向挤压转换的开端；第 2 期为晚三叠世孕育、晚侏罗世—白垩纪以来的强烈逆冲反转，始于晚三叠世印支期华北与扬子板块碰撞所诱导的初始挤压，并于晚侏罗世—白垩纪在太平洋板块俯冲的叠加作用下强烈活化，最终形成大规模的逆冲推覆构造，完成了由先存张性断层向挤压构造体系的根本转型。

3) 认为银洞子地区乌拉力克组泥页岩的分布受 2 期反转构造作用控制：第 1 期弧后拉张环境下的同沉积正断层控制了深水相厚层泥页岩的原始沉积，微弱构造反转可能形成页岩包裹角砾灰岩的有利油气甜点区；第 2 期强烈构造反转使先存断层转化为逆冲断层，导致页岩分布位置向东推覆迁移至

高部位。

4) 明确了惠沙断裂上盘以西、青平断裂下盘以东区域为乌拉力克泥页岩最有利沉积区域, 平面上有利沉积区带为鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南段西北部的深洼陷。

参考文献 (References)

- 毕珉烽, 张达, 吴淦国, 狄永军, 阙朝阳, 潘锦波, 薛伟. 2015. 滇东南麻栗坡一带中生代构造变形及其对钨多金属矿床的控制作用. 地学前缘, 22(4): 223-238. [Bi M F, Zhang D, Wu G G, Di Y J, Que C Y, Pan J B, Xue W. 2015. Mesozoic tectonic deformation and ore-controlling of tungsten polymetallic deposits in Malipo area, southeastern Yunnan. Earth Science Frontiers, 22(4): 223-238]
- 陈念楠, 李满根, 宋志杰, 关宝文, 段建兵, 李西得, 刘武生, 范鹏飞, 刘颖. 2025. 二连盆地塔北凹陷反转构造特征与砂岩型铀矿之间的关系. 物探与化探, 49(1): 22-31. [Chen N N, Li M G, Song Z J, Guan B W, Duan J B, Li X D, Liu W S, Fan P F, Liu Y. 2025. Relationships between inverted structures and sandstone-hosted uranium deposits in the Tabei sag, Erlian Basin. Geophysical and Geochemical Exploration, 49(1): 22-31]
- 陈青. 2015. 南北构造带中北段及其邻区岩石圈有效弹性厚度及构造意义. 西北大学博士学位论文. [Chen Q. 2015. The lithosphere effective elastic thickness and its tectonic significance in central-northern segment of north-south tectonic belt and adjacent area. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 陈昭年, 陈发景. 1995. 反转构造与油气圈闭. 地学前缘, 2(3): 96-102. [Chen Z N, Chen F J. 1995. Inversion structures and hydrocarbon traps. Earth Science Frontiers, 2(3): 96-102]
- 褚庆忠. 2004. 含油气盆地反转构造研究综述. 西安石油大学学报 (自然科学版), 19(1): 28-33, 91-92. [Chu Q Z. 2004. Summary of inversion structure on petroliferous basin. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 19(1): 28-33, 91-92]
- 邓军, 王庆飞, 黄定华, 高帮飞, 杨立强, 徐浩. 2005. 鄂尔多斯盆地基底演化及其对盖层控制作用. 地学前缘, 12(3): 91-99. [Deng J, Wang Q F, Huang D H, Gao B F, Yang L Q, Xu H. 2005. Basement evolution of the Ordos Basin and its constraint on cap rock. Earth Science Frontiers, 12(3): 91-99]
- 董云鹏, 张国伟, 赵霞, 姚安平. 2003. 北秦岭元古代构造格架与演化. 大地构造与成矿学, 27(2): 115-124. [Dong Y P, Zhang G W, Zhao X, Yao A P. 2003. The Proterozoic tectonic framework and evolution of the North Qinling Orogen, Central China. Geotectonica et Metallogenia, 27(2): 115-124]
- 傅力浦, 胡云绪, 张子福, 王树洗. 1993. 鄂尔多斯中、上奥陶统沉积环境的生物标志. 西北地质科学, (2): 1-96. [Fu L P, Hu Y X, Zhang Z F, Wang S X. 1993. The mark on the ecology of sedimentary environment in Middle and Upper Ordovician at Ordos Basin. Northwest Geoscience, (2): 1-96]
- 高振中, 罗顺社, 何幼斌, 张吉森, 唐子军. 1995. 鄂尔多斯地区西缘中奥陶世等深流沉积. 沉积学报, 13(4): 16-26. [Gao Z Z, Luo S S, He Y B, Zhang J S, Tang Z J. 1995. The Middle Ordovician contourite on the west margin of Ordos. Acta Sedimentologica Sinica, 13(4): 16-26]
- 龚再升, 李思田. 2004. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究. 北京: 科学出版社. [Gong Z S, Li S T. 2004. Dynamic Research of Hydrocarbon Accumulation in the Northern Continental Marginal Basins of South China Sea. Beijing: Science Press]
- 郭英海, 刘焕杰. 1999. 鄂尔多斯地区晚古生代的海侵. 中国矿业大学学报, 28(2): 126-129. [Guo Y H, Liu H J. 1999. Transgression of Late Paleozoic era in Ordos area. Journal of China University of Mining & Technology, 28(2): 126-129]
- 胡望水. 1996. 松辽盆地北部正反转构造与油气聚集. 天然气工业, 16(5): 20-24. [Hu W S. 1996. Positive inverted structures and petroleum accumulation in the northern Songliao Basin. Natural Gas Industry, 16(5): 20-24]
- 贾振远, 蔡华, 蔡忠贤, 秦玉娟. 1997. 鄂尔多斯地区南缘奥陶纪层序地层及海平面变化. 地球科学, 22(5): 491-503. [Jia Z Y, Cai H, Cai Z X, Qin Y J. 1997. High-frequency carbonate cycles of Early Paleozoic in the southern margin of Ordos Basin. Earth Science, 22(5): 491-503]
- 李长圣, 尹宏伟, 徐雯娟, 吴珍云, 管树巍, 贾东, 任荣. 2022. 基于离散元的挤压构造定量分析与模拟. 大地构造与成矿学, 46(4): 645-661. [Li C S, Yin H W, Xu W Q, Wu Z Y, Guan S W, Jia D, Ren R. 2022. Quantitative analysis and simulation of compressive tectonics based on discrete element method. Geotectonica et Metallogenia, 46(4): 645-661]
- 李江海, 章雨, 王洪浩, 王殿举. 2020. 库车前陆冲断带西部古近系盐构造三维离散元数值模拟. 石油勘探与开发, 47(1): 65-76. [Li J H, Zhang Y, Wang H H, Wang D J. 2020. Three-dimensional discrete element numerical simulation of Paleogene salt structures in the western Kuqa foreland thrust belt. Petroleum Exploration and Development, 47(1): 65-76]
- 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 刘鑫, 龚淑云, 索艳慧, 戴黎明, 马云, 许立青, 曹现志, 王鹏程, 孙文军, 杨朝, 朱俊江. 2013. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换. 海洋地质与第四纪地质, 33(3): 65-94. [Li S Z, Yu S, Zhao S J, Liu X, Gong S Y, Suo Y H, Dai L M, Ma Y, Xu L Q, Cao X Z, Wang P C, Sun W J, Yang Z, Zhu J J. 2013. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental margin. Marine Geology & Quaternary Geology, 33(3): 65-94]
- 李伟, 高日胜. 2010. 济阳拗陷正反转构造发育特征与油气成藏. 中国石油勘探, 15(5): 17-22. [Li W, Gao R S. 2010. Development characteristics of positive inversion tectonics and its controlling to hydrocarbon accumulation in Jiyang Depression. China Petroleum Exploration, 15(5): 17-22]
- 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]
- 刘少峰, 柯爱蓉, 吴丽云, 黄思骥. 1997. 鄂尔多斯西南缘前陆盆地沉积物源分析及其构造意义. 沉积学报, 15(1): 157-161. [Liu S F, Ke A R, Wu L Y, Huang S J. 1997. Sediment provenance analysis and its tectonic significance in the foreland basin of the Ordos southwestern margin. Acta Sedimentologica Sinica, 15(1): 157-161]
- 刘源, Konietzky Heinz. 2019. 基于离散元方法对走滑拉分盆地演化及次级断裂扩展过程研究. 地质力学学报, 25(5): 840-852. [Liu Y, Heinz K. 2019. Particle-based modeling of crack propagation during pull-apart basin development. Journal of Geomechanics, 25(5): 840-852]
- 任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 刘新社. 2006. 鄂尔多斯盆地热演化

- 程度异常分布区及形成时期探讨. 地质学报, 80(5): 674-684. [Ren Z L, Zhang S, Gao S L, Cui J P, Liu X S. 2006. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 674-684]
- 汤良杰, 金之钧. 2000. 塔里木盆地北部隆起牙哈断裂带负反转过程与油气聚集. 沉积学报, 18(2): 302-309. [Tang L J, Jin Z J. 2000. Negative inversion process and hydrocarbon accumulation of Yaha fault belt in northern uplift, Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(2): 302-309]
- 王燮培, 严俊君, 林军. 1989. 反转构造及其石油地质意义. 地球科学, 14(1): 101-108. [Wang X P, Yan J J, Lin J. 1989. The inverted structure and its significance in petroleum geology. *Earth Science*, 14(1): 101-108]
- 魏嘉怡, 张雷, 王红伟, 曹茜, 井向辉, 杨亚娟, 张艳, 刘刚, 李涵. 2025. 鄂尔多斯盆地西缘南段古生界油藏地质特征及其构造演化与成藏耦合关系. 地球科学, 50(5): 1933-1952. [Wei J Y, Zhang L, Wang H W, Cao Q, Jing X H, Yang Y J, Zhang Y, Liu G, Li H. 2025. Geological characteristics and their coupling relationship between structural evolution and reservoir formation of Paleozoic oil reservoirs in the southern section of the western edge of the Ordos Basin. *Earth Science*, 50(5): 1933-1952]
- 吴珍云, 尹宏伟, 李长圣, 孙业君, 李丽梅, 杜航, 何奕成, 刘博雅. 2019. 断陷盆地正反转构造实验模拟及对茅东断裂带的启示. 南京大学学报(自然科学版), 55(5): 869-878. [Wu Z Y, Yin H W, Li C S, Sun Y J, Li L M, Du H, He Y C, Liu B Y. 2019. Experimental simulation of the positive inversion structure in rift basin and its enlightenment to Maodong fault zone. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 55(5): 869-878]
- 徐雯婧, 汪伟, 尹宏伟, 贾东, 李长圣, 杨庚兄, 李刚. 2020. 库车坳陷东西段盐下构造变形差异演化数值模拟分析. 地质学报, 94(6): 1740-1751. [Xu W Q, Wang W, Yin H W, Jia D, Li C S, Yang G X, Li G. 2020. Numerical simulation of different subsalt structural features and their evolution in the eastern and western segments of the Kuqa Depression. *Acta Geologica Sinica*, 94(6): 1740-1751]
- 曾维特, 丁文龙, 久凯, 吴礼明, 李超, 许长春. 2012. 反转构造进展与油气聚集关系. 科技导报, 30(2): 58-64. [Zeng W T, Ding W L, Jiu K, Wu L M, Li C, Xu C C. 2012. Review of inversion structure and the relationship between hydrocarbon accumulation and inversion structure. *Science & Technology Review*, 30(2): 58-64]
- 张维. 1991. 海绵的分类、演化及其地质意义. 古生物学报, 30(6): 772-783. [Zhang W. 1991. Classification, evolution and geological significance of fossil sponges. *Acta Palaeontologica Sinica*, 30(6): 772-783]
- 赵红格. 2003. 鄂尔多斯盆地西部构造特征及演化. 西北大学博士学位论文. [Zhao H G. 2003. Structural characteristics and the evolution in western Ordos Basin. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 赵永强. 2007. 北部湾盆地涠西勘探区反转构造及其油气成藏意义. 石油实验地质, 29(5): 457-461. [Zhao Y Q. 2007. Inversion structure and its implication to hydrocarbon accumulation in Weixi exploration region of the Beibuwan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(5): 457-461]
- 周易, 于福生, 刘志娜. 2019. 分层伸展叠加变形二维离散元模拟. 大地构造与成矿学, 43(2): 213-225. [Zhou Y, Yu F S, Liu Z N. 2019. Superimposed extensional deformation of different layers: insights from two dimensional discrete element modeling. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(2): 213-225]
- Athy L F. 1930. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *AAPG Bulletin*, 14(1): 1-24.
- Bally A W. 1983. Tectogenese at seismique reflexion. *Bulletin Society Geologique France*, 7: 279-285.
- Cooper M A, Williams G D. 1989. *Inversion Tectonics*. London: Geological Society Special Publication, 44.
- Cundall P A, Strack O D L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1): 47-65.
- Dean S L, Morgan J K, Fournier T. 2013. Geometries of frontal fold and thrust belts: insights from discrete element simulations. *Journal of Structural Geology*, 53: 43-53.
- Glennie K W, Boegner P L E. 1981. Sole pit inversion tectonics. In: Illing L V, Hobson G D (eds). *Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-west Europe*. London: Institute of Petroleum, 110-120.
- Harding T P. 1985. Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structural inversion. *AAPG Bulletin*, 69(4): 582-600.
- Li C X, Liu Z, Wang S C, Xu Z Y, Chen S G, You X L, Wang B. 2022. Prediction of major source rocks distribution in the transition from depressed to rifted basin using seismic and geological data: the Guyang to Linhe Formations in the Linhe Depression, Hetao Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214: 110472.
- Li C X, Liu Z, Chen C, Wang Y G, Liu F, Xu M, Yang Y, Wang B, Chen S G. 2024. Predicting the thermal maturity of source rock from well logs and seismic data in basins with low-degree exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 221: 105300.
- Liu S F. 1998. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(4): 369-383.
- Mitra S. 1993. Geometry and kinematic evolution of inversion structures. *AAPG Bulletin*, 77(7): 1159-1191.
- Moustafa A R. 2014. Structural architecture and tectonic evolution of the Maghara Inverted Basin, Northern Sinai, Egypt. *Journal of Structural Geology*, 62: 80-96.
- Sclater J G, Christie P A F. 1980. Continental stretching: an explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B7): 3711-3739.
- Ventisette C D, Montanari D, Sani F, Bonini M. 2006. Basin inversion and fault reactivation in laboratory experiments. *Journal of Structural Geology*, 28(11): 2067-2083.
- Williams G D, Powell C M, Cooper M A. 1989. *Geometry and kinematics of inversion tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 44: 3-15.
- Zhu R X, Chen L, Wu F Y, Liu J L. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 789-797.

(责任编辑 张西娟)