

鄂尔多斯克拉通地块活化了吗?

何登发¹,包洪平²,开百泽¹,许艳华¹,鲁人齐³,张才利²,魏柳斌²,成祥¹[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083;2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,陕西 西安 710018;
3. 中国地震局地质研究所,北京 100029]

摘要:克拉通地块在演化过程中的活动性是大陆保存状态研究的核心内容,克拉通不同程度的活动性与油、气、煤、铀和盐类等矿产资源密切相关,制约着板内的地震活动,因此是能源、资源与环境研究的热点之一。以华北克拉通西部的鄂尔多斯地块为例,以地块内部的深井与高精度反射地震剖面为基础,揭示了鄂尔多斯地块的构造活动性,并将这种活动性称之为“活化”。研究表明,自中元古代以来,鄂尔多斯克拉通地块的活化表现在6个方面:①地块内部或周缘发育了中元古代、寒武纪—早奥陶世、石炭纪—早二叠世、中—晚三叠世与新生代等5期裂陷或伸展活动;②地块内部发育了中—新元古代、奥陶纪、晚石炭世、中—晚三叠世、早白垩世与中新世晚期—第四纪等6期岩浆活动,尤以长城纪、早白垩世岩浆活动为盛;③发育了7个时期的断裂系统及断层相关褶皱;④发育了长城系与前长城系、蓟县系与前蓟县系、震旦系与前震旦系、寒武系与前寒武系、奥陶系与前奥陶系、石炭系与前石炭系、三叠系与前三叠系、侏罗系与前侏罗系、白垩系与前白垩系、第四系与前第四系等10个区域性不整合面;⑤经历了中—新元古代、早古生代、石炭纪—三叠纪与侏罗纪—白垩纪等4个构造沉降旋回,沉降中心发生明显迁移;⑥新生代地块周缘地区快速裂陷并沉降充填,内部则隆升剥蚀,地块周缘及内部均发生了一系列强震活动。鄂尔多斯地块的演化受周缘板块构造背景与深部构造活动的强烈控制,早白垩世的岩石圈可能经历了大规模减薄,新生代晚期地块北部的岩石圈发生活化和减薄,这与鄂尔多斯地块逆时针旋转、上地幔物质部分熔融及其沿周缘地堑系薄弱带上侵有关。鄂尔多斯地块已发生了较明显的活化,活化事件对成盆、成烃与成藏可能具有重要意义。

关键词:岩浆活动;区域不整合面;裂谷作用;构造沉降;构造迁移;克拉通活化;鄂尔多斯地块

中图分类号:TE121.2 **文献标识码:**A

Has the Ordos Block, a cratonic block been reactivated?

He Dengfa¹, Bao Hongping², Kai Baize¹, Xu Yanhua¹, Lu Renqi³, Zhang Caili², Wei Liubing², Cheng Xiang¹

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China]

Abstract: The activity of a cratonic block during its evolution is the key in studying the continental preservation. Cratonic block reactivation of diverse scales is in close relation to mineral deposits such as oil, gas, coal, uranium and salt, and controls the intra-plate earthquake activity, thus has been one of the hot topics in the field of energy, resource, and environment researches. The Ordos Block located in western North-China craton (NCC), is taken to reveal its tectonic activities, referring to as “reactivation” in the study. The analysis of deep boreholes and high-resolution reflection seismic profiles, indicates that the reactivation of the Ordos Block can be shown in six aspects as follows. First, five stages of rifting or extension in or around the block occurred during the Mesoproterozoic, the Cambrian to Early Ordovician, the Carboniferous to Early Permian, the Middle to Late Triassic, and the Cenozoic; second, there were six stages of magmatism in the block during the Middle to Late Proterozoic, the Ordovician, the Late Carboniferous, the Middle to Late Triassic, the Early Cretaceous, and the Late Miocene to Quaternary, with the magmatic events coming to peak during the Changchengnian Period and the Early Cretaceous; third, there were seven stages of faulting and development of faulting-related folds; fourth, there are ten regional unconformities developed

收稿日期:2022-06-16;修订日期:2022-08-22。

第一作者简介:何登发(1967—),男,博士、教授,盆地构造与油气地质综合研究。E-mail: Hedengfa282@263.net。

基金项目:中国石油长庆油田公司科技攻关项目(ZDZX2021-01)。

including the Ch/AnCh, Jx/AnJx, Z/AnZ, ϵ /An ϵ , O/AnO, C/AnC, T/AnT, J/AnJ, K/AnK, and Q/AnQ; fifth, the block underwent four tectonic subsidence cycles of the Middle to Late Proterozoic, the Early Paleozoic, the Carboniferous to the Triassic, and the Jurassic to Cretaceous, with a marked migration of the subsiding centers; and sixth, a number of strong earthquakes occurred along the peripheries and the interior of the Ordos Block with the interior uplifting while the periphery rifting and rapidly subsiding during the Cenozoic. The evolution of the Ordos Block is predominantly controlled by the adjoining plate tectonics and the deep tectonic activities, to some extent with a possible large-scale thinning of the lithosphere in the Early Cretaceous, and also the reactivation and thinning of the lithosphere in northern part of the Ordos Block during the Late Cenozoic, which is resulted from the anti-clockwise rotation of the block, and thus the upward intrusion of the partial molten melts of the upper mantle along the weak zones of the graben systems around. The Ordos Block therefore took typical properties of reactivation, which may have played a profound role in the basin formation, the hydrocarbon generation, and the pool-formation in the block.

Key words: magmatism, regional unconformity, rifting, tectonic subsidence, tectonic migration, cratonic reactivation, Ordos Block

引用格式: 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯克拉通地块活化了吗?[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1271-1291. DOI: 10.11743/ogg20220601.

He Dengfa, Bao Hongping, Kai Baize, et al. Has the Ordos Block, a cratonic block been reactivated?[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1271-1291. DOI: 10.11743/ogg20220601.

克拉通是大陆的组成单元。它的形成经历了含陆壳块体的板块之间的碰撞造山作用,形成了主要的山链(如喜马拉雅山脉),碰撞山链在400~200 Ma被剥蚀,遗留的山根暴露地表,成为先存地块之间的“缝合线”^[1]。复杂拼贴的地块与山根构成了今天的“克拉通”,即克拉通是碰撞造山的最终产物,形成一个克拉通至少需要300 Myr,形成之后则是长期保持稳定的大陆块体^[1-2],发育在克拉通上的沉积盆地称为克拉通盆地。

华北克拉通的西部为鄂尔多斯地块,长期被认为是稳定地块的典型代表^[3-9]。发育其上的鄂尔多斯盆地地层平缓,褶皱、断裂等不发育,也被认为是稳定的克拉通盆地^[7,10-11]。但近年来随着深钻井、大地电磁、反射地震等资料的增多,逐渐发现鄂尔多斯盆地发育多个区域性不整合面^[12],其周缘与内部也有岩浆活动,不同尺度的断裂也较为发育,盆内和盆缘都有地震发生,鄂尔多斯克拉通“似乎”具有一定的“活动性”。鄂尔多斯克拉通地块“活化”了吗?若已活化,其程度怎么样?活化的板块构造环境与深部地质背景是什么?活化的机制是什么?地块活化与油、气、煤、盐、铀等矿产资源的赋存有什么联系?这些都是亟待研究的基础科学问题。

在地质学中,表征“活化”有几个名词。①Activation(活化、激活):意思是开(驱,起,启)动;触发;活化(作用);活性(化);激活;使……产生放射性;敏化;在地质学中如用酸处置粘土或获得物质的放射性都称为活化。②Reactivation:再活化,再激活,被恢复活动,再生(作用)。③Mobility(流动性、活动性):为

W. Penck使用的术语^[13],指的是“地壳隆升的相对速率主要决定了由剥蚀过程产生的地貌的性质”的概念。

④Mobilization(动员、调动、活化):指的是使固体岩石具有足够塑性令其流动或使其活动组分发生化学迁移的某种过程;或使岩石有价值的成分重新分布与富集,从而形成实际或潜在的矿床的某种作用。

在槽-台学说盛行期,对于地台的活动性,B. B. 别洛乌索夫称为“地台活化”,黄汲清称之为“再生”,陈国达称之为“地洼”^[14]。陈国达在1956年发现大陆地壳的新构造单元——地洼区,并在此基础上创建了壳体大地构造学,发展成为地洼(活化)构造理论体系,称为“地洼”学说或“动-定转化递进”说。1959年3月,陈国达在《科学通报》上发表了《地壳第三构造单元——地洼区》,他认为地洼区具有3方面特征:①岩浆活动十分强烈,地球上一些地区发生大规模的中-酸性岩侵入活动;②升降幅度增大,地貌反差加剧,如中生代北升、南降;③形成了丰富的内、外生矿床。自1992年起陈国达用活化构造理论(简称活化构造论)作为地洼学说的同义语使用,热能聚散交替、地幔蠕动是构造-岩浆活化理论创建初期提出的动力学机制假说^[15]。

根据前人认识^[9,12,14-15],本文将“克拉通活化”定义为“克拉通地块具备了一定程度的活动性”或“克拉通地块失去了一定程度的稳定性”。而克拉通稳定性整体丧失的地质现象则被称为克拉通破坏或去克拉通化^[16],如华北克拉通东部。

本文通过对鄂尔多斯盆地不整合面、岩浆活

动、热体制、断裂与褶皱作用、构造沉降、地震活动及地球物理场等方面的研究,来判断鄂尔多斯克拉通地块或者局部构造单元是否发生了“活化”,并讨论可能的活化机制。

1 鄂尔多斯地块与活化相关的主要构造事件

1.1 克拉通内部及边缘裂谷作用

自中元古代以来,鄂尔多斯地块在不同区域发生了5期裂谷活动,强度不一,分布不均。

1.1.1 中元古代裂谷

在中元古代,鄂尔多斯地块东南缘有熊耳裂陷槽(约1.78 Ga)、北缘有白云鄂博裂陷槽(1.73~1.68 Ga)、东北缘有燕辽裂陷槽(1.73~1.62 Ga, 1.37~1.32 Ga)、西缘有贺兰裂陷槽(1.73~1.68 Ga)^[17-23]。而在鄂尔多斯地块内部(图1),则发育3排NE向裂谷^[12,21],分别是宁-蒙裂陷带、甘-陕裂陷带与秦-晋裂陷带,这些裂陷带呈NE-SW向展布,向NE方向收敛,向SW拓宽、加深;在鄂托克旗—杭锦旗一带,则发育NNE—NE向裂陷群。这些裂陷带整体呈宽裂谷结构,在剖面上发育2~3幕裂陷层序。沉积充填厚达500~3 000 m,为一套石英砂岩、岩屑砂岩、泥岩夹火山岩的沉积组合。长城系主体以滨海相碎屑岩沉积为主,岩性主要为厚层的石英砂岩夹火山岩;蓟县系以陆表海碳酸盐岩台地相含硅质的藻白云岩沉积为主;震旦系仅分布在鄂尔多斯盆地南缘与西缘,主体以冰期沉积的冰碛砾岩为主^[21]。盆地内部的探井,如盆地中部桃利庙地区的桃59井,西部马家滩地区的古探1井和天深1井,西南部陇东地区的庆深1井等,已揭示长城系发育浅成—超浅成辉绿岩脉体或玄武质火山岩^[20-21,24],厚5~60 m;在盆地西缘桌子山长城系地表露头区亦可见基性的侵入岩脉^[23,25-26]。反映出鄂尔多斯地区长城纪总体处于区域伸展背景下,沿基底断裂发生幔源岩浆的侵入或火山喷发活动。

1.1.2 寒武纪—早奥陶世伸展体制

这一时期,鄂尔多斯地块南、北缘发育成为被动大陆边缘^[12,26],分别与二郎坪洋盆、古亚洲洋盆相关;南侧被动陆缘具裂谷型边缘结构,发育向南倾斜的阶状正断层组合;西缘发育贺兰裂陷槽^[22-26],充填台地相—斜坡相—半深海相沉积,经构造复原,该裂陷槽东界发育西倾正断层组合,受正断层旋转影响,靠海一侧下奥

陶统发育台地边缘高能相带,靠陆一侧局部发育潟湖相沉积,如梁探1井附近。在鄂尔多斯地块内部,靖边—米脂一带,发育中—小尺度的正断层组合,对奥陶系沉积具有明显的控制作用。

1.1.3 石炭纪—早二叠世伸展体制

在石炭纪—早二叠世,鄂尔多斯地块整体沉降,接受海—陆过渡相沉积。在其西侧贺兰山带,上石炭统羊虎沟组(C_{2y})不整合于太古宙花岗岩体之上(图2)。分析表明,太古宇经历长期伸展剥露、隆升剥蚀,羊虎沟组岩性为深灰、灰黑色页岩夹薄层砂岩,为一套快速沉降背景下的较深水沉积^[27]。

1.1.4 中—晚三叠世伸展体制

鄂尔多斯地块区域性沉降,发育了面积超过20×10⁴ km²的大型湖泊,西至景泰,东至太行山东侧,南至北秦岭,北至伊盟隆起南缘,以河流—湖泊相沉积为主,厚达1 000~2 000 m。上三叠统延长组7段的半深湖—深湖区面积达6×10⁴ km²,水体深度达100~120 m;发育大面积展布的凝灰岩与泥岩互层,在局部1 m岩层中含有20~30层凝灰岩。

1.1.5 周缘新生代断陷

自始新世以来,鄂尔多斯地块南侧有渭河—汾河地堑系、西侧发育银川地堑、北侧发育河套地堑^[28-29],这些地堑的莫霍面均有3~4 km的隆升,内部有数千米的河流、湖泊相沉积充填,为快速断陷背景下的近源沉积充填组合,以断陷期沉积为主。这些断陷发育在早期隆起带的高部位,为隆起带负反转所形成,靠山一侧皆有控制断陷发育的大型正断层。鄂尔多斯地块内部则以隆升剥蚀为主,黄土高原面为3 Ma以来形成。

1.2 岩浆事件及其分布和成因

新的钻井及周缘地质调查揭示,鄂尔多斯地块及邻区发生了6期岩浆活动(图3)。

1.2.1 中—新元古代

盆地内部桃59、李34、古探1、天深1、庆深1等井钻揭了长城纪岩浆活动^[12,20-21,24]。鄂尔多斯地块南缘—北秦岭地区有新元古代(979.0~711.0 Ma)的岩浆活动。

1.2.2 奥陶纪

在鄂尔多斯地块南缘、西缘等地奥陶系见多层凝

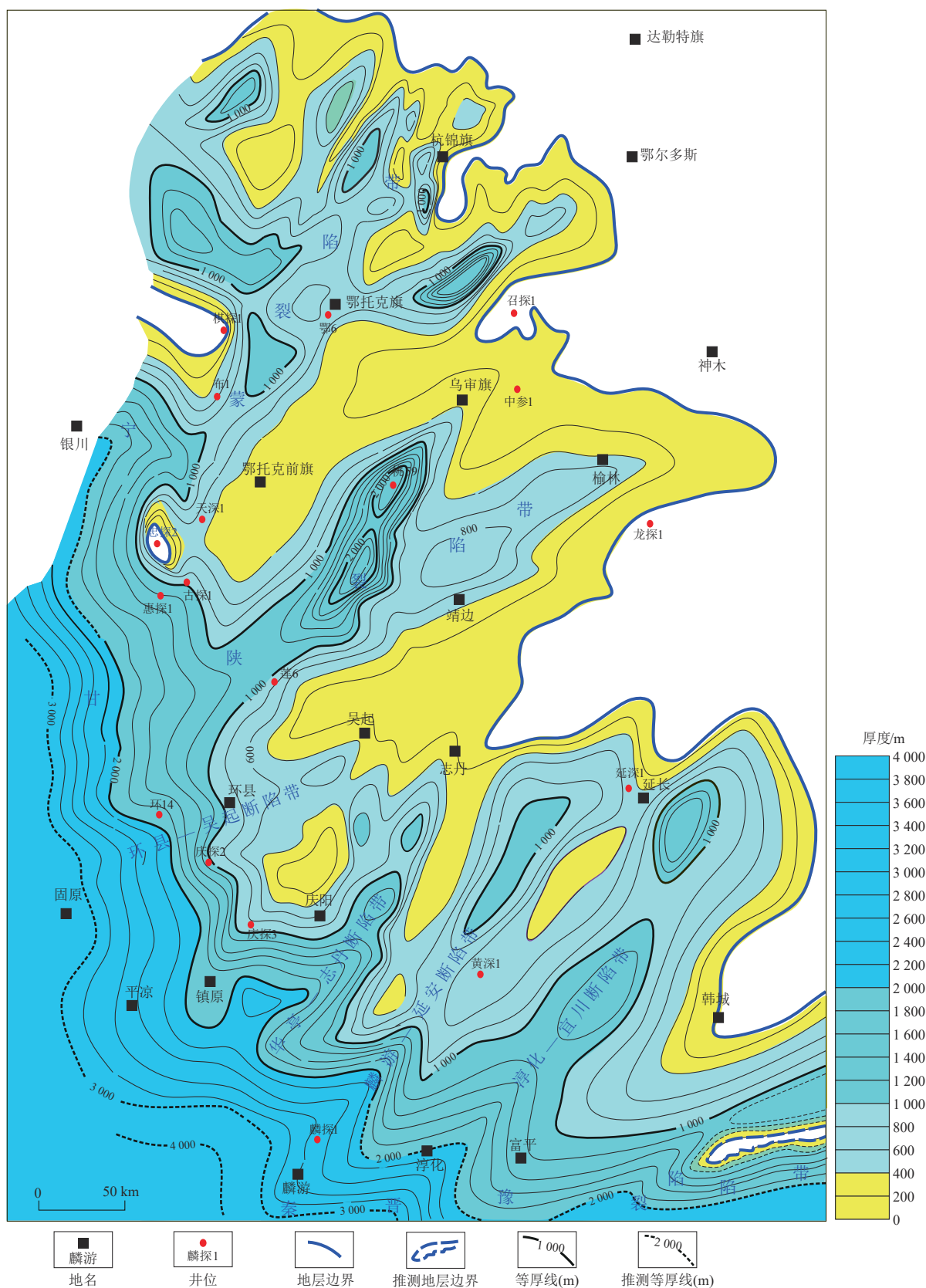


图1 鄂尔多斯盆地长城纪裂陷槽分布

Fig. 1 Distribution map of the Changchenian rift trough in the Ordos Basin

灰岩,如西南缘奥陶系见多套斑脱岩夹层^[25,30-32],为中奥陶世祁连-秦岭洋向北俯冲、弧后盆地内火山喷发

的沉积记录,火山喷发集中于早奥陶世晚期—中奥陶世早期(465.8 Ma±8.3 Ma~449.0 Ma±3.0 Ma);应用



图2 贺兰山森林保护区上石炭统羊虎沟组与太古宙花岗岩体之间的不整合

Fig. 2 Unconformity between the Upper Carboniferous Yanghugou Formation and the Archaeozoic granite in the Helanshan Mountain Forest Conservation Area

(剖面位于N39°18'10.77", E106°35'37.32", 镜头指向NNE向。)

断裂破碎带内次生方解石原位U-Pb测年,也识别出西南缘晚奥陶世(452.0 Ma±13.0 Ma)存在一期热液改造事件^[33]。秦岭地区早古生代岩浆活动强烈,集中在507.0~400.0 Ma,与丹凤洋盆、二郎坪洋盆的俯冲、闭合事件有关^[34-36]。

1.2.3 晚石炭世

贺兰山地区广泛发育晚古生代镁铁质辉绿岩墙^[25,27]。走向以NE向和近EW向为主,少量为NNW向;岩墙规模差异大,从数米到数千米不等。宗别立辉绿岩墙属于高铁拉斑玄武岩系列,对采自不同位置的镁铁质岩墙的锆石进行U-Pb年代学分析得出303.5 Ma±2.5 Ma和206.0 Ma两组谐和年龄^[25,27,37],前一组即为晚石炭世的辉绿岩,晚石炭世岩浆岩来源于被俯冲流体改造的富集岩石圈地幔,可能形成于晚石

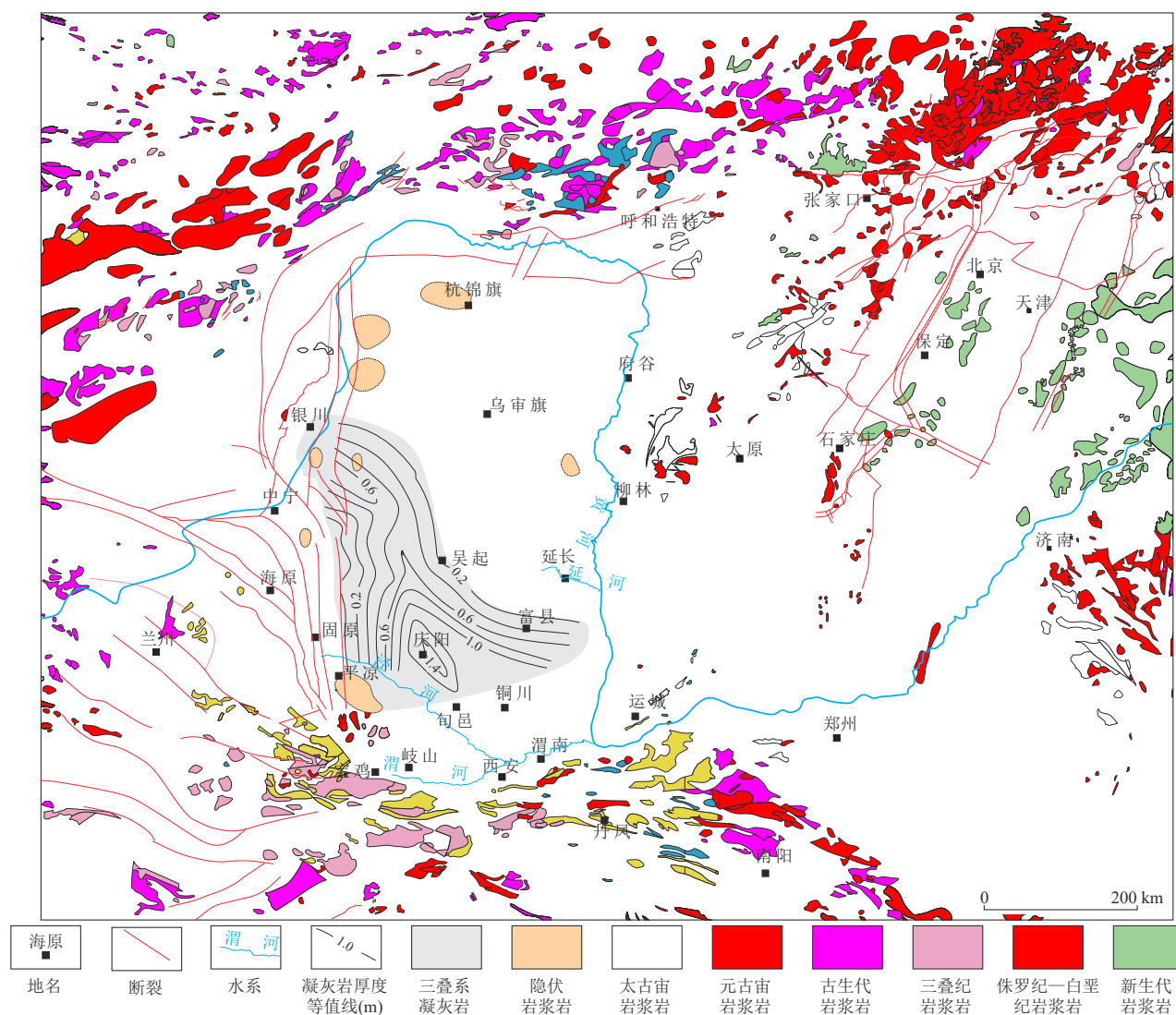


图3 鄂尔多斯地块及其周缘岩浆岩分布

Fig. 3 Magmatite distribution in the Ordos Block and on its periphery

炭世古亚洲洋向南俯冲导致的贺兰山地区形成的弧后伸展环境^[25-27]。

1.2.4 中-晚三叠世

在盆地内部延长组可见多层凝灰岩(图3),分布十分广泛^[38-40],厚度在1.0~1.5 m,年龄约为241 Ma。盆地西缘汝箕沟地区二道沟、大岭-鼓鼓台一带出露拉斑玄武岩,玄武岩产状平缓,对这套岩石曾获得多组年龄,玄武岩锆石U-Pb年龄为 $344.0 \text{ Ma} \pm 22.0 \text{ Ma}$, $241.0 \text{ Ma} \pm 7.0 \text{ Ma}$ ^[41-44]和 $191.0 \text{ Ma} \pm 3.0 \text{ Ma}$ ^[27];从其与下伏上三叠统延长组呈整合接触、其上与中侏罗统延安组以微角度不整合接触来看,岩石形成时间在晚三叠世和中侏罗世之间^[27]。贺兰山地区白寺口镁铁质岩墙锆石U-Pb年龄为 $241.7 \text{ Ma} \pm 1.1 \text{ Ma}$ ^[25]。以白寺口辉绿岩和汝箕沟玄武岩为代表的中生代早期岩浆活动主要为岩石圈地幔的部分熔融,形成于陆内裂谷环境,代表了中三叠世—早侏罗世贺兰山内部的一次伸展事件^[25],其形成可能与古亚洲洋闭合及中亚造山带碰撞后的岩石圈伸展有关,形成了陆内裂谷^[27,42-44]。

鄂尔多斯地块北缘中-晚三叠世的钾长花岗岩、二长花岗岩及碱性杂岩沿阴山-燕山构造带分布,是古亚洲洋关闭的产物。鄂尔多斯地块南缘及秦岭地区,见早中生代(250.0~185.0 Ma)岩浆活动,印支期花岗岩见于南秦岭和北秦岭部分地区,有250.0~240.0 Ma和225.0~185.0 Ma两个高峰期(图3)。

1.2.5 早白垩世

盆地内部在伊盟隆起、紫金山、桐城、龙门等地区发育该期岩浆活动。内蒙古杭锦旗黑石头沟(GPS: $N40^{\circ}6.784'$, $E109^{\circ}13.719'$),下白垩统砂岩之上发现了一层玄武岩,为碱性橄榄玄武岩,Ar-Ar年龄为 $126.2 \text{ Ma} \pm 0.4 \text{ Ma}$ ^[45-46]。在伊盟隆起保尔太沟、伊12井一带的下白垩统泾川组见有玄武岩,在喇嘛沟有辉绿岩侵入^[47]。鄂尔多斯地块南部崇信县铜城镇以南的桃梢岫-庙滩一带,有超钾质岩体分布,岩性为霓辉黑榴二长斑岩与假白榴石斑岩,锆石U-Pb年龄为 $110.8 \text{ Ma} \pm 1.0 \text{ Ma}$ 和 $107.6 \text{ Ma} \pm 0.9 \text{ Ma}$,为早白垩世,可能为EMI型富集地幔来源^[48];陇县华亭地区龙1井和龙2井在三叠系中钻遇了厚达150 m以上的霞石正长岩、闪长玢岩,年龄为早白垩世。鄂尔多斯盆地东缘临县紫金山碱性杂岩形成于138.0~125.0 Ma^[49];山西地块过渡带上岩浆活动主要集中在140.0~100.0 Ma。华北克拉通中部、西部与东部的岩浆活动时间是近于同时的,表明克拉通的破坏或改造均为早白垩世,指示华北陆

块西部岩石圈可能也有相应岩石圈减薄作用发生。

鄂尔多斯地块周缘晚中生代岩浆活动也较为发育。秦岭地区160.0~100.0 Ma的花岗岩主要见于北秦岭地区东部(图3)。北缘在阴山西段的白云鄂博一带也有该期花岗岩出露,多为A型花岗岩,且铁镁质微粒包体常见,指示了强烈的岩浆混合与壳幔物质交换。

1.2.6 伊盟隆起晚中新世

在和林格尔台格斗村东侧山沟(GPS: $N40^{\circ}30.277'$, $E111^{\circ}51.820'$)分布有橄榄拉斑玄武岩,Ar-Ar年龄为6.4 Ma,为晚中新世^[46]。鄂尔多斯地块东北部在晚中新世发生了上地幔物质上隆和地壳伸展,相邻的大同地区有第四纪火山活动。

1.3 断裂活动及其褶皱作用

鄂尔多斯地块主要发育7个时期的断裂系统及断层相关褶皱。

1.3.1 中元古代正断层组合

该组合以半地堑、堑-垒构造为主(图1)^[12,20-21,24],发育正断层转折褶皱、正断层传播褶皱、转换斜坡等构造样式。该组合在中元古界广泛分布,如宁-蒙裂陷带、甘-陕裂陷带与秦-晋裂陷带等3个NE向裂陷带。该期沉积充填构成鄂尔多斯盆地下构造层。

1.3.2 寒武纪—早奥陶世正断层组合

鄂尔多斯地块南缘、西缘主要发育阶梯状正断层组合,阶梯状正断层主要向地块外侧倾斜,寒武系与中-下奥陶统向现今山系一侧逐渐加厚。鄂尔多斯盆地东部发育一系列NNE向和NS向小尺度的正断裂组合,对形成台内高、低地貌有明显控制作用,高地貌区发育高能滩相,低洼区发育低能泥质岩组合。

1.3.3 中-晚奥陶世冲断系统

该冲断系统主要发育在鄂尔多斯地块南缘及西缘。如图4所示,寒武系-奥陶系南厚北薄,向北逆冲在蓟县系之上,该冲断系统之上为上石炭统本溪组所不整合覆盖,代表加里东期的冲断前锋。图4左端的大断层,断穿奥陶系-三叠系,代表燕山期的构造变形,此变形叠加在加里东期冲断变形之上。图5显示中卫市兴仁镇S205公路边的奥陶系香山群页岩、粉砂岩变质成千枚岩、片岩,发生揉皱,枢纽陡立,石英脉被褶皱,代表加里东期的强烈变形。在这一带,可见香山群逆冲在泥盆系与石炭系之上。由此可见,加里东期

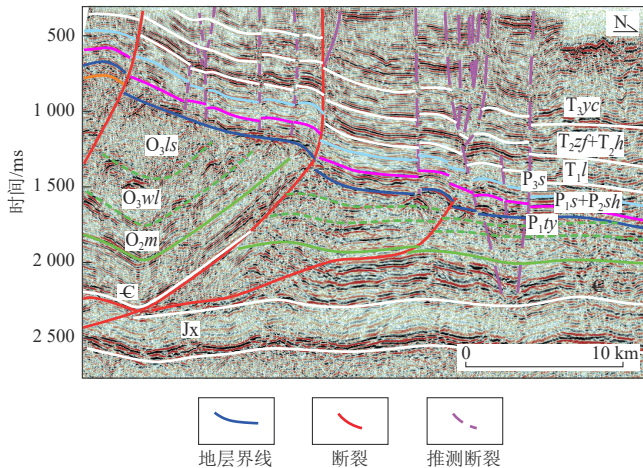


图4 鄂尔多斯地块南侧南北向地震剖面(G1204剖面局部)

Fig. 4 NS-trending seismic profile in the southern Ordos Block (part of the profile G1204)

Jx. 蓟县系; C. 寒武系; O_{3m}. 中奥陶统马家沟组; O_{3wl}. 上奥陶统乌拉克组; O_{3ls}. 上奥陶统拉什仲组; P_{1ty}. 下二叠统太原组; P_{1s}. 下二叠统山西组; P_{2sh}. 中二叠统石盒子组; P_{3s}. 上二叠统石千峰组; T_{1l}. 下三叠统刘家沟组; T_{2h}. 中三叠统和尚沟组; T_{2zf}. 中三叠统纸坊组; T_{3yc}. 上三叠统延长组



图5 中卫市兴仁镇S205公路边香山群片岩、千枚岩变质、变形特征

Fig. 5 Metamorphic and deformation features of schist and phyllite of the Ordovician Xiangshan Group on the roadside outcrop of S205 in Xingren County, Zhongwei City (位于N37°2'13.13", E105°16'38.74", 镜头指向W向。)

的挤压构造变形在鄂尔多斯地块的南缘与西缘表现较为强烈^[50-51]。

1.3.4 晚石炭世—二叠纪伸展系统

该伸展系统主要发育在盆地西缘。如图2所示,经历加里东期挤压变形后,贺兰山一带再次发生伸展^[22-23,27],充填较厚的海—陆过渡相页岩、粉砂岩、煤系沉积,厚达500~1500 m。

1.3.5 晚侏罗世—早白垩世初期冲断系统

晚侏罗世—早白垩世初期,鄂尔多斯地块西缘、南缘、东缘与北缘均发生向盆地内部的挤压变形,这是鄂尔多斯地块构造变形最为强烈的时期^[52-69]。如图6所示,该剖面自西向东切过银川断陷—横山堡逆冲带等构造区带,横山堡逆冲带早期呈台阶状冲断层向东逆冲,向西地貌依次升高,导致前新生界由东向西依次剥蚀减薄或尖灭,横山堡逆冲带为基底卷入型冲断层系统,断层向下进入前长城系韧性剪切层,剖面上构成压扭构造组合(图6a)。在局部放大图中(图6b),可清楚见到中侏罗统与下伏三叠系、二叠系、奥陶系等之间的削截不整合接触关系(图6b中I部位),为印支运动的产物。而下白垩统与中侏罗统之间为下削上超关系,其间缺失上侏罗统,中侏罗统在横山堡断层上盘自东、西两端向中部被削蚀,中侏罗统底部不整合面(印支运动面)被褶皱,从下白垩统底部不整合面的褶皱样式来看(图6b中II部位),横山堡断层活动于侏罗纪末期,形成了断层传播褶皱背斜带;横山堡断层端点止于白垩系底部不整合面(燕山早期运动面)。下白垩统底部向西超覆于横山堡构造带的削蚀区之外,表明下白垩统的沉积范围拓宽,进入热沉降拗陷阶段。而下白垩统顶部与渐新统清水河组(E_{3q})之间呈削截不整合接触(燕山晚期运动面)(图6b中III部位),下白垩统自东向西被剥蚀,渐新统自西向东逐层超覆,说明二者之间经历了强烈的构造运动。不仅缺失了上白垩统一始新统,而且二者之间发生了由挤压向伸展的转换。燕山早期、晚期运动在横山堡构造带发生叠加。新生代银川地堑的东翼叠加在燕山期剥蚀面之上^[70-71]。

鄂尔多斯地块南缘在燕山期冲断变形强烈(图4)。在渭北隆起泾河大桥东侧约1 km处,纸坊组(T_{2zf})上段下部发育一个由南向北的大型逆冲推覆构造,由两个前翼倒转的断层传播褶皱背斜与一个断层转折褶皱背斜构成,下伏一典型的向北抬升的低角度台阶状逆冲断层,为燕山期南缘冲断系统的前锋断层。

鄂尔多斯地块东缘的盆—山过渡带依据地面出露的构造特征、地震剖面断裂构造样式、断裂性质等特征,自南而北可划分为韩阳—东王、龙亭—黑龙关、黑龙关—中阳、离石—交楼申与兴县—清水等5个区段,并可进一步细划为韩阳、韩城、店坪、黑龙关、中阳、离石、方山、河曲、清水等9个亚段,均为燕山期冲断形成^[72-73]。不同段之间存在构造转换。

鄂尔多斯地块北缘这一时期的挤压变形强烈^[27],如在伊盟隆起南侧,沿三眼井—乌兰林格断裂形成大

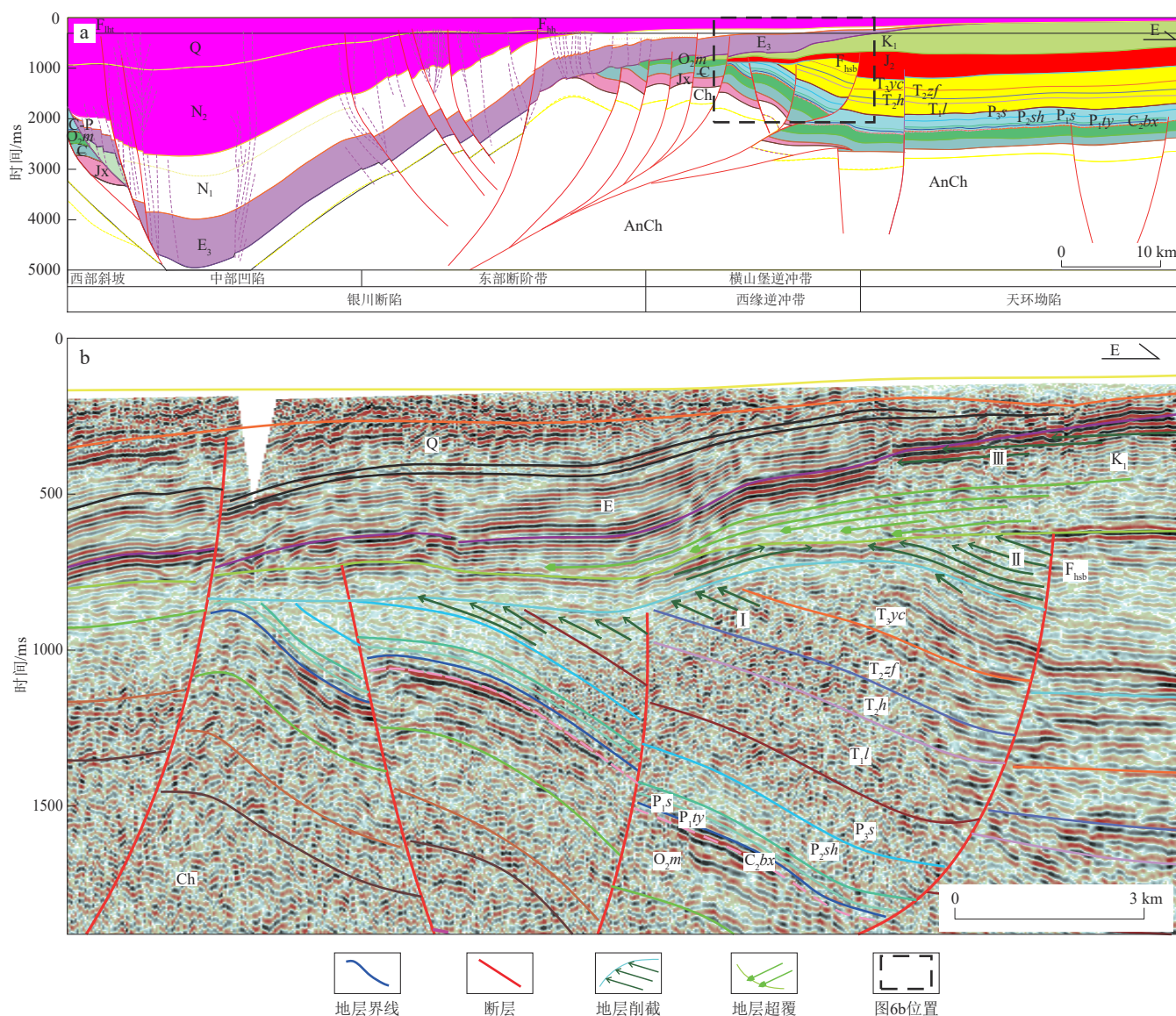


图6 鄂尔多斯盆地西缘横山堡冲断带地震-地质解释剖面(a)及局部地震剖面放大图(b)

Fig. 6 Geological interpretation of the seismic section (a) crossing and the zoom-in (b) of part of the Hengshanpu thrust belt at the western margin of the Ordos Basin

Ch. 长城系; AnCh. 前长城系; Jx. 蓟县系; C. 寒武系; O_{2m}. 中奥陶统马家沟组; C_{2bx}. 上石炭统本溪组; P_{1ty}. 下二叠统太原组; P_{2s}. 下二叠统山西组; P_{2sh}. 中二叠统石盒子组; P_{3s}. 上二叠统石千峰组; T_{1l}. 下三叠统刘家沟组; T_{2h}. 中三叠统和尚沟组; T_{2zf}. 中三叠统纸坊组; T_{3yc}. 上三叠统延长组; P. 二叠系; C. 石炭系; J₂. 中侏罗统; K₁. 下白垩统; E₃. 渐新统; E. 古近系; N₁. 中新统; N₂. 上新统; Q. 第四系; F_{lu}. 芦花台断裂; F_{lu}. 黄河断裂; F_{hsb}. 横山堡断裂。

型的多期活动的断层传播褶皱背斜带^[12],形成了三眼井、乌兰吉林、泊尔江海子、李家渠等断裂带。

1.3.6 古近纪始新世—第四纪周缘地堑系统

鄂尔多斯地块周缘在始新世以来发育地堑系统^[74-75]。如图6a,银川地堑叠加在西缘冲断系统之上^[70-71],渐新统不整合在长城系或前长城系之上,表明在地堑形成之前,地堑中心部位经历了长期的隆升、剥蚀。银川地堑位于原来隆起的高部位。渭河地堑也具有类似特征,钻井资料表明渐新统高陵群不整合在寒

武系之上。

1.3.7 中新世晚期—第四纪西南缘弧形冲断系统

10 Ma以来,青藏高原东北缘逆冲作用于鄂尔多斯地块西南缘,在海原断裂和六盘山断裂一带发生压扭性活动,陇西地块向东南挤出,将原来的始新世—中新世盆地改造,形成了海原断裂(10 Ma)、天景山断裂带(8~5 Ma)、香山断裂带(2 Ma)等前展式弧形断裂系统,构成鄂尔多斯地块西南缘向西北撒开、向东南收敛的帚状断裂系统。在地壳结构上,鄂尔多斯地块呈静

止的Ⅱ型构造楔,而青藏高原东北缘上地壳向上逆冲,下地壳则向下俯冲,形成“鳄鱼嘴”构造样式^[76]。这一构造活动可能作用于整个鄂尔多斯地块,使其发生了逆时针旋转运动^[12]。

1.4 区域不整合面及其成因机制

鄂尔多斯盆地自下而上发育的沉积盖层包括中-新元古界的长城系、蓟县系、震旦系,下古生界的寒武系、奥陶系,上古生界的石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系及白垩系,新生界发育不全,盆地普遍缺失志留系-泥盆系,大部分缺失震旦系、下石炭统、上白垩统,新生界平面分布局限性大。

依据不整合面发育特征,将鄂尔多斯盆地地层划分为6大构造层:中-新元古界构造层、下古生界构造层、上古生界-三叠系构造层、侏罗系构造层、白垩系构造层和新生界构造层;具多旋回叠合盆地的发育特征^[7,10-12]。

在鄂尔多斯盆地,由下至上识别出10个区域不整合面:长城系与前长城系(Ch/AnCh)、蓟县系与前蓟县系(Jx/AnJx)、震旦系与前震旦系(Z/AnZ)、寒武系与前寒武系(C/AnC)、奥陶系与前奥陶系(O/AnO)、石炭系与前石炭系(C/AnC)、三叠系与前三叠系(T/AnT)、侏罗

系与前侏罗系(J/AnJ)、白垩系与前白垩系(K/AnK)、第四系与前第四系(Q/AnQ)(图2,图4—图6);还发育二叠系与前二叠系(P/AnP)、古近系与前古近系(E/AnE)等局部不整合面。盆地本部主要发生了5次大的隆升剥蚀。

1) 长城系底部不整合面:为长城系碎屑岩与下伏基底高级变质岩之间的异岩不整合,也是角度不整合面。即克拉通经历长期剥露、剥蚀之后,长城系为其第一套沉积盖层^[24],为伸展背景之下的裂谷充填沉积(图1)。

2) 蓟县系底部不整合面:蓟县系沉积范围较长城系大为缩小,主要偏于盆地的西部,与长城系之间为低角度不整合-平行不整合。长城系为断陷沉积,蓟县系则具有拗陷沉积特点,以硅质白云岩为主。

3) 震旦系底部不整合面:鄂尔多斯地块震旦系罗圈组冰碛岩分布局限,仅见于西缘和南缘^[24],与蓟县系之间缺失青白口纪沉积。这表明鄂尔多斯地块在新元古代大范围处于隆升剥蚀状态,推测与宽坪洋盆关闭引起的区域挤压与隆升有关^[12]。

4) 寒武系底部不整合面:在鄂尔多斯盆地缺失寒武系底部沉积,多数地区自下寒武统上部辛集组或中寒武统毛庄组开始沉积,剥蚀时间较长(图7a)。寒武系向

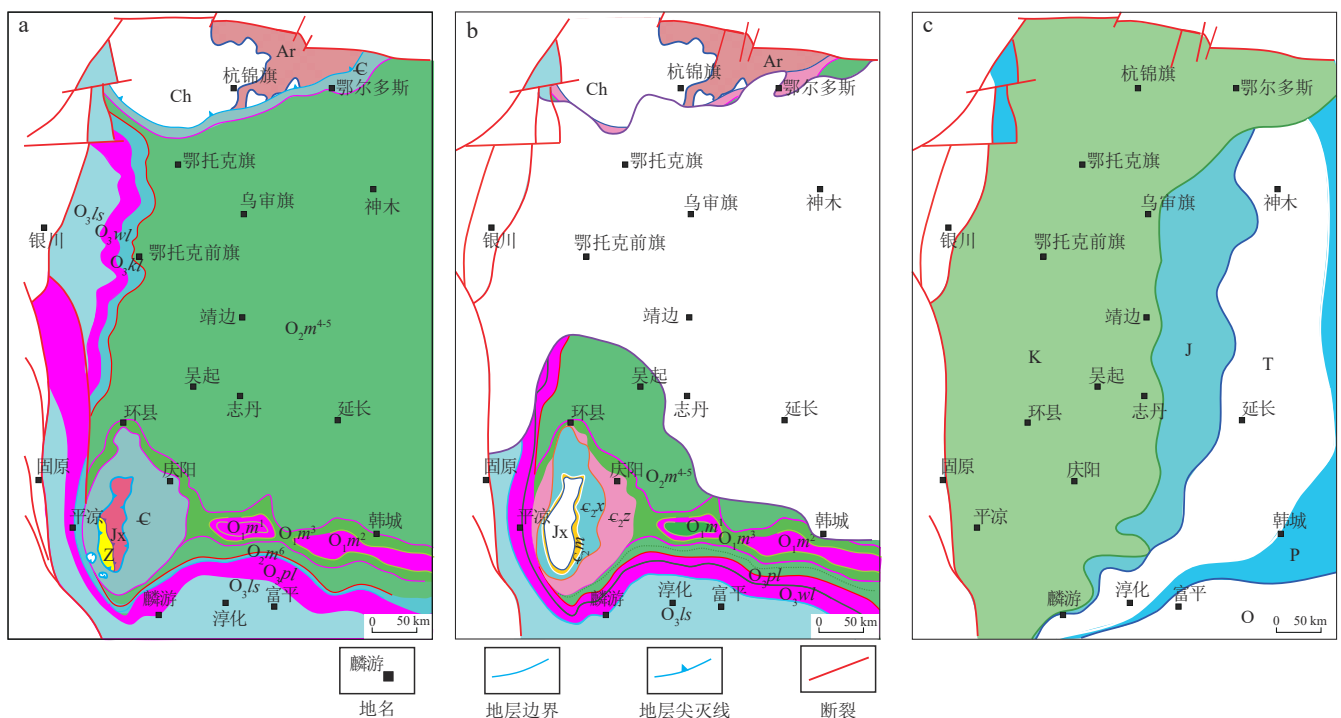


图7 鄂尔多斯盆地地层分布特征

Fig. 7 Stratigraphic distribution of the Ordos Basin

Ch. 长城系;Jx. 蓟县系;Z. 震旦系;C. 寒武系;C₂. 中寒武统;C_{2x}. 徐庄组;C_{2m}. 毛庄组;O. 奥陶系;O_{2m}. 马家沟组;O_{3kl}. 克里摩里组;O_{3wl}. 乌拉拉克组;O_{3pl}. 平凉组;C_{2bx}. 本溪组;P. 二叠系;T. 三叠系;J. 侏罗系;K. 白垩系;Ar. 太古宇

a. 石炭系沉积前地层分布;b. 二叠系沉积前地层分布;c. 新生界沉积前地层分布

伊盟隆起、镇原隆起、乌审旗隆起等高部位逐渐超覆。

5) 奥陶系底部不整合面:鄂尔多斯地块东缘、东南缘发育冶里组和亮甲山组,其余大多数地区缺失,马家沟组不整合于下伏地层之上(图7a),其间缺失时限达10~20 Myr。马家沟组底界在岩性上存在明显的突变关系,盆地周缘马家沟组底部普遍发育砾岩、石英砂岩或泥岩(云质泥岩或泥质云岩);在华北克拉通上,该不整合面也称为怀远运动面^[77-79]。怀远运动具多阶段“幕式”活动特点,从中寒武世张夏期末一直延续到早奥陶世亮甲山期,经历了海床抬升、暴露剥蚀、振荡性沉积等多个阶段^[77],其中亮甲山末期与马家沟期之间的沉积间断在区域上稳定分布,是该运动形成的主要不整合面,沉积间断时限达3~18 Myr^[79]。

6) 石炭系底部不整合面:主要为上石炭统与奥陶系之间的不整合面。在西缘、南缘、东缘可见角度不整合面,在盆地内部为平行不整合面或低角度削截不整合面,其间缺失时限达150~230 Myr。该期运动即加里东运动^[7,12](图2,图4—图6,图7b),为鄂尔多斯地块南缘商丹洋盆关闭引起的区域挤压所致^[34-36]。

7) 三叠系底部不整合面:该不整合面常不易被识别。为下三叠统刘家沟组与下伏地层之间的低角度—平行不整合,盆地内部可见整合接触。为华北地块北侧索伦洋盆闭合在盆地内部的响应,但剥蚀时限较短。

8) 侏罗系底部不整合面:如图6b,盆地内部缺失下侏罗统—上三叠统长(延长组)1段—长3段,缺失时限为20~40 Myr,是华北地块与扬子地块碰撞、拼合后在盆地内部的响应^[80-82]。在华北克拉通东部形成一系列EW向延伸的背斜带与向斜带。

9) 白垩系底部不整合面:是燕山运动在盆地内部的响应^[64-69,83-85](图6b)。图7c中的侏罗系呈SN向分布,是鄂尔多斯地块东、西向挤压的结果。但实际上,鄂尔多斯地块南、北向的挤压也很强,如伊盟隆起南侧的三眼井—乌兰林格断裂带、渭北隆起的三叠系—侏罗系的挤压冲断构造(图4)。鄂尔多斯地块四周受挤的构造背景及其构造作用产物是鄂尔多斯盆地构造活动的一个典型特色。

10) 第四系底部不整合面:第四系砂砾、黄土等不整合在下伏中生界之上,为气候与隆升共同控制的结果。

在一个“稳定”的克拉通盆地内却发育了10个区域性不整合面,这些不整合面多数还是响应周缘板块构造事件的产物(即区域性海退事件影响较小)^[12,35-36,65,80,83-85],表明鄂尔多斯地块在周围板块活动的控制下活动性较强。

1.5 构造沉降的时-空差异变化

克拉通的构造沉降是反映其成因机制及其平面变化的灵敏标志。从鄂尔多斯盆地不同构造部位的构造沉降曲线及构造沉降速率来看,构造沉降具有明显的旋回性与平面差异性。除中—新元古代的裂陷—拗陷旋回外,鄂尔多斯盆地还发育早古生代、石炭纪—三叠纪与侏罗纪—白垩纪等构造沉降旋回(图8)。

从图8可知,鄂尔多斯盆地在中寒武世毛庄期缓慢沉降,徐庄期与张夏期快速沉降;而晚寒武世三山子期发生隆升。在早奥陶世,冶里组—亮甲山组沉积期发生隆升剥蚀,马(马家沟组)一段—马二段沉积期缓慢沉降、马三段沉积期(马三期)快速沉降、马四期缓慢沉降、马五期快速沉降、马六期缓慢沉降,呈现出不等时的缓慢、快速相间的沉降特点,即出现非线性变化特点。整体而言,桃59井较之宁探1井的构造沉降量更大。

对其他层系的构造沉降量进行分析,得到了大致相似的结果(图8)。构造沉降的3个沉降旋回中共发育了11个沉降中心,早古生代沉降旋回的沉降中心位于盆地西缘与南缘,石炭纪—三叠纪的沉降中心位于盆地西缘、西南缘和北缘,侏罗纪—白垩纪的沉降中心位于盆地西缘,呈南北向展布(图7c)。

沉降中心的迁移反映出不同部位构造沉降量的显著变化,也体现出沉降机制如热沉降、挠曲沉降或动力沉降等综合效应的平面变化以及随时间的变化。关于这一点,有待于基于探井的高分辨率分析结果来验证。

1.6 鄂尔多斯地块及其周缘强震活动

鄂尔多斯地块周缘渭河地堑、汾河地堑、银川地堑、河套地堑及西南缘海原—六盘山断裂带一线,是现代大陆强震活动区(图9)。在盆地中南部,沿基底NE向断裂带,也有多个 M_L (里氏震级)5.0级以上地震分布,表明鄂尔多斯地块已经进入一个活跃期。河套地堑系、汾渭地堑系、银川地堑系、海原—六盘山断裂带是强烈活动带,平凉—吴起、铜川—延川、晋西挠褶带也是地震活动带。

2 鄂尔多斯地块“活化”相关的板块构造背景与深部背景

2.1 周缘板块构造背景

鄂尔多斯地块在不同时期遭受了周缘板块构造活动的影响^[34-36,56,59,67,76,84-85]。在古生代,受南、北洋盆打

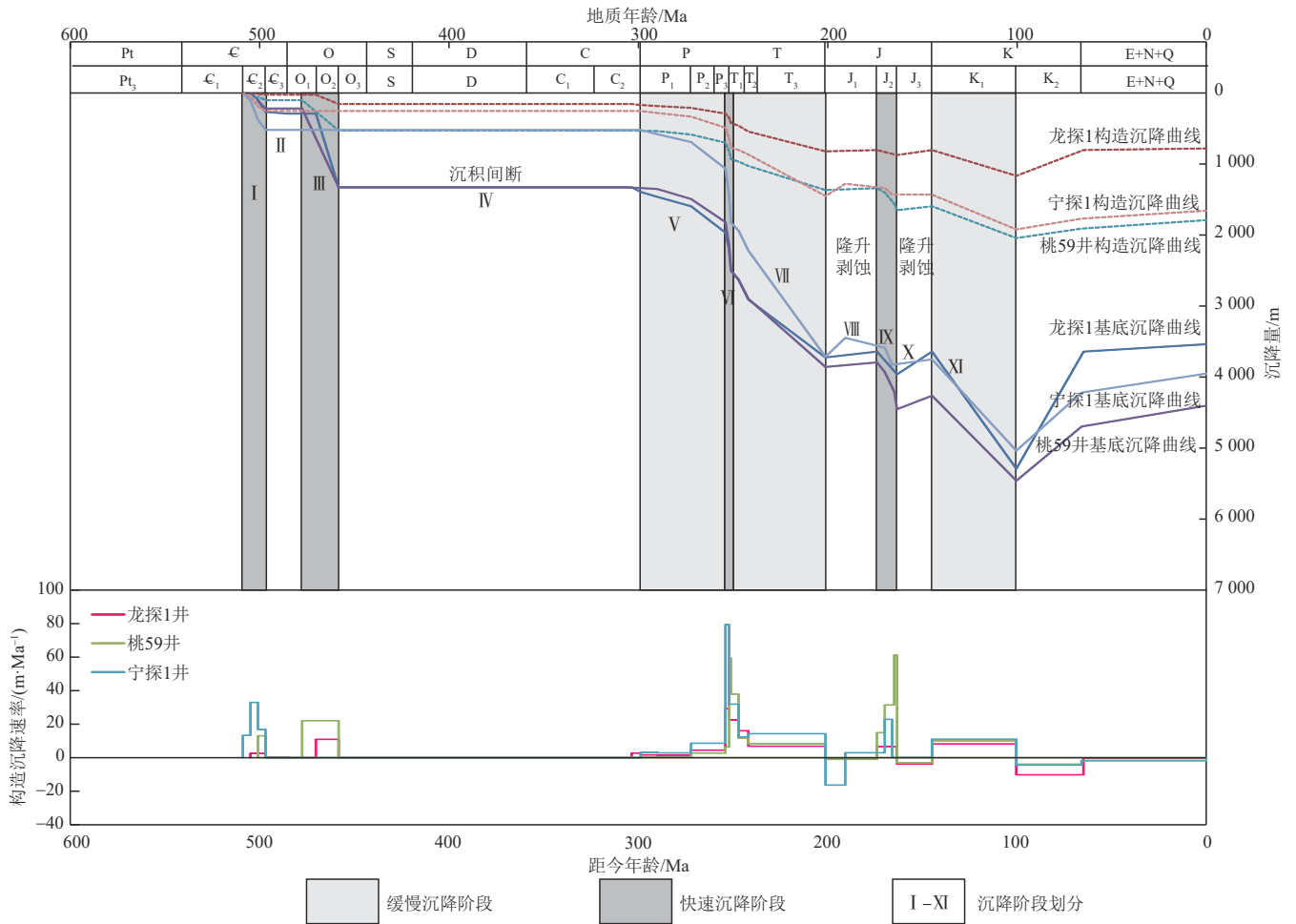


图8 鄂尔多斯盆地构造沉降量与构造沉降速率变化特征

Fig. 8 Variations of tectonic subsidence amplitude and rate in the Ordos Basin

开、扩张与俯冲、关闭的直接影响^[86-88],形成伸展与聚敛构造体制;而在侏罗纪以来,远离板块边界,以陆内构造变形为特征^[85,89]。

鄂尔多斯地块北侧的古亚洲洋起始于新元古代晚期,主要发育于寒武纪—奥陶纪^[86-87]。沿索伦—温都尔庙—西拉木伦一线存在新元古代—中志留世的蛇绿岩以及二叠纪蛇绿岩^[86-87],沿该线早古生代和二叠纪均存在洋盆或者处于洋壳俯冲阶段。奥陶纪—志留纪初,在索伦和温都尔庙附近存在洋壳俯冲,并形成岛弧,以橄榄岩、枕状玄武岩、玄武质安山岩、安山岩和硅质岩等为特征;晚志留世,洋盆开始关闭;二叠纪末—三叠纪,该洋盆自西向东呈剪刀状最终闭合^[90]。

鄂尔多斯地块南侧在早古生代发育商丹洋盆与二郎坪洋盆,为原特提斯洋的一部分^[34-36]。位于北秦岭及南秦岭之间的商丹洋形成于600~534 Ma,向北俯冲在北秦岭陆块之下。根据北秦岭构造带变质岩(510~400 Ma)及岩浆岩(514~420 Ma)年代学及地壳深熔和混合岩化的时代(517~445 Ma)推断^[36,88],商丹洋的俯

冲起始于514 Ma或稍晚,一直持续到大约420 Ma结束^[88-89]。位于北秦岭与华北克拉通南缘之间的二郎坪弧后盆地在508 Ma左右逐渐打开形成洋盆并开始扩张,在450 Ma或稍晚洋盆闭合,导致了华北克拉通南缘及北秦岭北部S型花岗岩的形成^[36,90]。这是中—晚奥陶世(至早石炭世)华北克拉通南缘强烈挤压、冲断、隆升与剥蚀的构造背景^[12,91]。

中生代早期,因勉略洋盆的关闭^[34],华北地块与扬子地块碰撞,发生近南北向大陆汇聚。华北克拉通上形成近WE向褶皱带。但在中三叠世末期—晚三叠世,鄂尔多斯地块上稳定发育了大型湖盆。最新研究表明^[92-93],这一湖盆形成于伸展构造背景^[12]。

中—晚侏罗世,华北克拉通及邻区受古太平洋、蒙古—鄂霍茨克洋与班公—怒江洋俯冲与关闭的控制^[85,94]。180~150 Ma古太平洋板块发生俯冲作用,140~110 Ma蒙古—鄂霍茨克洋的关闭与班公—怒江洋盆的最终关闭^[95-97],形成了中国大陆三面受挤的构造背景^[66-67,84-85]。狼山构造带于178~175 Ma发生NW—

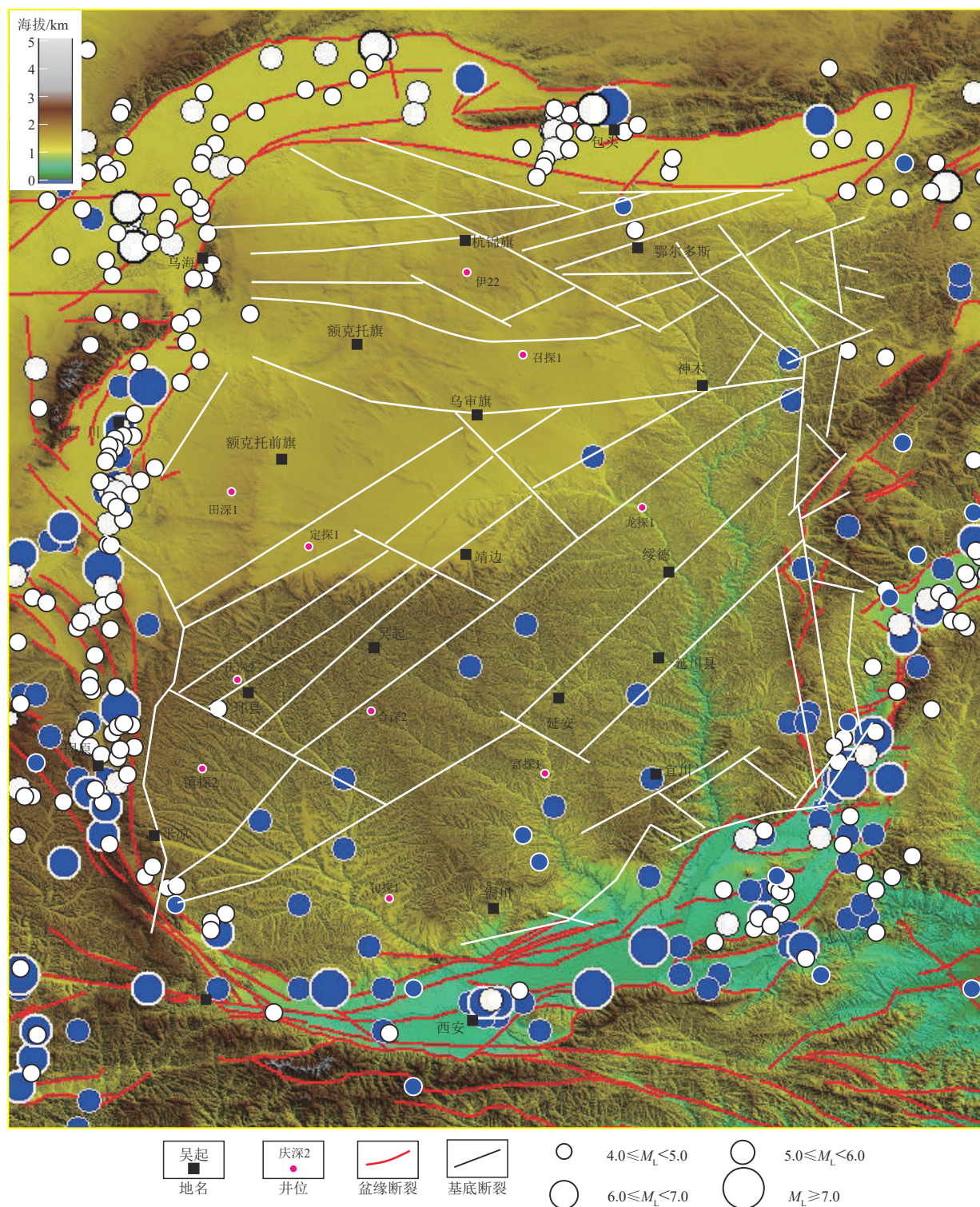


图9 鄂尔多斯地块内部及周缘的中-强震活动

Fig. 9 Moderate and strong earthquake activities in the Ordos Basin and on its periphery

[数据(资料)来源:①国家地震科学数据中心;②中国地震局地质研究所;③蓝色圆圈为1970年前地震,白色圆圈为1970—2021年地震;④盆地内部的基底断层(黑色细线)分布据长庆油田公司资料。地震统计($M_L \geq 4.0$)截止时间为2021年3月。]

SE向的强烈挤压变形^[59,67,98],而太行山-吕梁山构造带则在165~150 Ma发生NW—NWW向挤压变形^[94],导致盆地内部遭受EW—NWW向挤压变形。

10 Ma以来,青藏高原东北缘向北扩展,对鄂尔多斯地块西南缘施加挤压作用^[74,76],陇西地块向东南挤出,鄂尔多斯地块发生了顺时针旋转。

2.2 深部构造背景

鄂尔多斯盆地在寒武纪—三叠纪处于降温过程,地温梯度自 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 降低到 $22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;侏罗纪—早白垩世则处于升温过程,早白垩世的古地温梯度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,盆地南部更高^[99-101];晚白垩世以来处于降温过程,第四纪降低到 $28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。根据地温梯度的约束,可以反推地壳厚度与岩石圈的厚度(热岩石圈厚度)^[102]。从地壳、岩石圈厚度的变化则可推断 250 Ma 以来鄂尔多斯地壳、岩石圈厚度及其伸展特征。模拟计算表明,早白垩世末期热岩石圈厚度减薄到 $50\sim 75\text{ km}$ ^[101],减薄量达 80 km 以上,岩石圈伸展率达 60% ,岩石圈伸展因子达 2.0 以上,地壳、岩石圈发生了非均一伸展(图 10)。

不同构造单元的地壳与岩石圈伸展变化趋势基本

一致(图 10),但变化量则相对较大(图 11)。在中生代开始时,热岩石圈厚度相对较厚,可达 180 km ,三叠纪末期变为 150 km ,各构造单元的厚度较为均一。

侏罗纪—早白垩世,热岩石圈开始迅速减薄(图 10,图 11)。其中,渭北隆起岩石圈减薄最为剧烈,从三叠纪末期的 150 km 减少至早白垩世末期的 70 km ,该区域的热岩石圈伸展因子可达 3.18 ,伸展率为 69% ;晋西挠褶带、伊盟隆起、伊陕斜坡的岩石圈厚度变化趋势较为一致,均从三叠纪末期的 150 km 左右减少至早白垩世末期的 90 km ,热岩石圈的伸展因子为 $2.4\sim 2.6$,伸展率为 $59\%\sim 62\%$;而天环坳陷与西部冲断带具有一致的变化趋势,从三叠纪末期的 150 km 减少至早白垩世末期的 105 km ,厚度变化最小,热岩石圈伸展因子为 $2.1\sim 2.2$,伸展率为 $52\%\sim 54\%$ 。

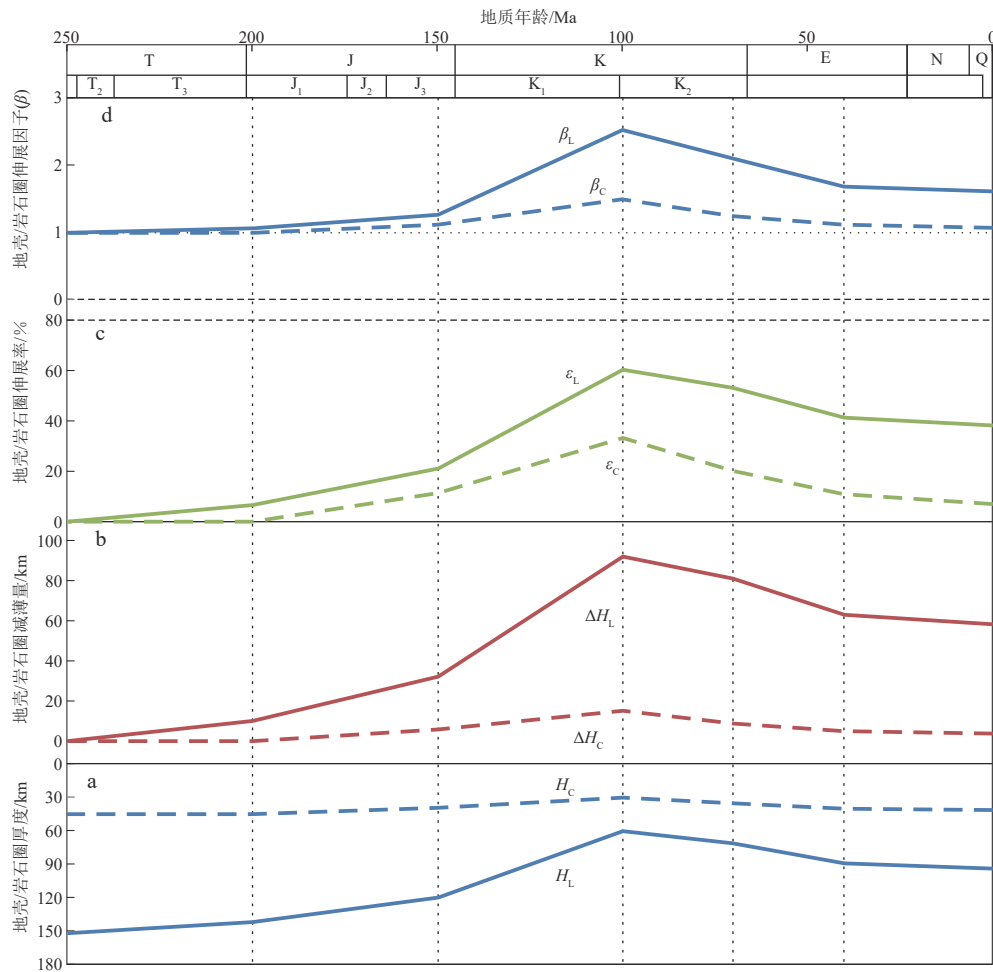


图 10 据 250 Ma 以来鄂尔多斯地块的地壳、岩石圈厚度变化(a)计算得到的地壳与岩石圈的减薄量(b)、伸展率(c)与伸展因子(d)

Fig. 10 Thickness variation of the crust and the lithosphere since the 250 Ma (a) and their calculated thinning (b), extension rate (c) and extension factor (d)

β_L . 岩石圈伸展因子,无量纲; β_C . 地壳伸展因子,无量纲; ε_L . 岩石圈伸展率,%; ε_C . 地壳伸展率,%; ΔH_L . 岩石圈减薄量,km; ΔH_C . 地壳减薄量,km;

H_C . 地壳厚度,km; H_L . 岩石圈厚度,km

(地壳厚度与岩石圈厚度据文献[101].)

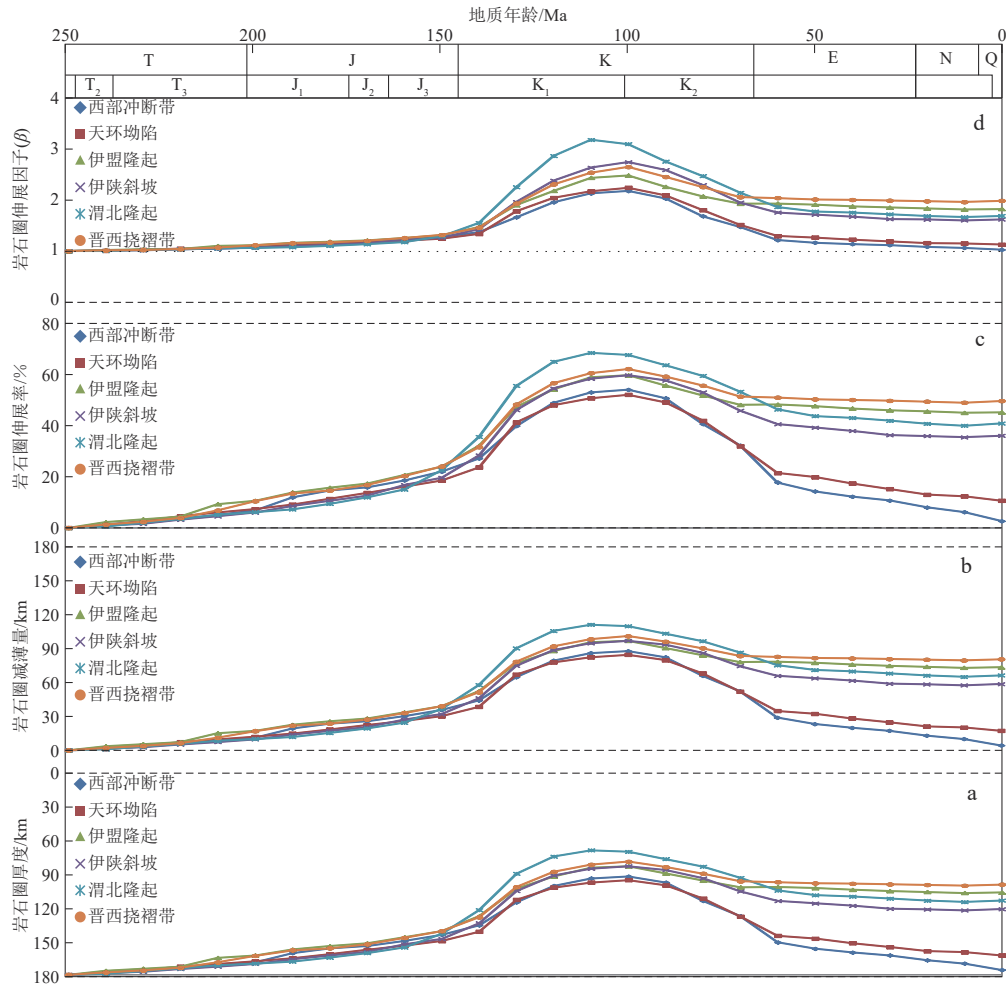


图 11 250 Ma 以来鄂尔多斯盆地不同构造单元岩石圈的厚度变化及伸展特征

Fig. 11 Thickness variation and extension features of the crust and lithosphere within each tectonic unit in the Ordos Basin since 250 Ma

a. 岩石圈厚度; b. 岩石圈减薄量; c. 岩石圈伸展率; d. 岩石圈伸展因子

(岩石圈厚度据文献[101]。)

此后,岩石圈厚度后期迅速增加至 79 ~ 133 km。至新生代,热岩石圈进一步增厚至 81 ~ 158 km^[101-102]。

上述分析是在“早白垩世的热岩石圈发生大规模减薄”的前提下得到的。这种计算的合理性仍值得商榷,若岩石圈减薄达到 80 km 以上,可能在地壳浅层会发生大规模伸展破裂,如同华北克拉通东部的渤海湾地区一样。若没有伸展,那么地温梯度的急剧增大又是什么原因? 前述的早白垩世鄂尔多斯地块内部大规模的岩浆活动又是如何形成的? 岩浆的大规模产生则需要增温过程,使岩石圈底部或下地壳部分熔融,其后沿薄弱带向上侵入或喷发地表。

2.3 鄂尔多斯地块逆时针旋转与其北部(至阴山带)中新世晚期—第四纪的活化

大地电磁与地震层析成像研究揭示了鄂尔多斯地块北部地壳—上地幔存在低速高导体,反映了该地区

上地幔可能存在部分熔融^[103-107]。

吕宏斌在鄂尔多斯盆地北部—河套地堑下方识别出了电阻率为 1 ~ 20 $\Omega \cdot m$ 的低阻异常区^[103],宽约 230 km,自深度约 180 km 的软流圈呈片状向上延至莫霍面,分为 3 个低阻异常区,而河套地堑之下的低阻异常区上延至上地壳,推测为地幔上涌导致的部分熔融物质所致^[103-105]。

沿 107.6°E 南北向剖面上,通过联合反演得到二维 S 波速度结构,在伊盟隆起及邻区,较深的低速异常反映了与深部物质上涌相关的地堑形成过程^[106]。

胡祥云研究了鄂尔多斯地块及周缘三维电性结构模型^[107],在 10, 35, 60, 90, 120, 150 km 深度切片上,识别出了鄂尔多斯地块北段及以北的内蒙古缝合带、阴山地块和中部造山带北段(包括汉诺坝、大同火山、五台—阜平地区、吕梁杂岩体南部)下方存在明显的“蘑菇状”高导体,该高导体由下地壳高导层(C_1)、岩石圈

层次近垂向高导体(C_3)和上地幔高导体(C_2)相连组成,组成自软流圈上延到地壳底界的“羽状”结构。与吕宏斌等的结果较为一致^[103-105],也与S波反演结果相吻合^[103,105]。该地区地壳-上地幔的高导、低S波速的特性,推测其成因为导电硫化物。结合早白垩世的岩浆岩和6.4 Ma的玄武岩活动^[46],还有大同近代火山活动,推测为上地幔上涌的部分熔融物质。

鄂尔多斯地块Pn波速度成像结果也表明^[108],在华北克拉通中部带的太行山、忻定盆地、大同盆地一带,鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起-阴山等区存在大面积的低速异常区,指示上地幔顶部的部分熔融,壳、幔

可能发生了较强的相互作用。

以上结果充分说明,鄂尔多斯地块以及华北中部造山带的北部在新生代发生了活化。图12给出了该区的6个低阻异常体(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 和 C_6)^[103-107],推测为上地幔部分熔融的部位。其成因与印-藏碰撞的远程效应有关,青藏高原东北缘发生弧形冲断,陇西地块向东南挤出,导致鄂尔多斯地块发生了逆时针旋转^[74,83-84,109-110],周缘形成地堑系统^[111-113],构成了岩石圈的软弱带;深部熔体沿着鄂尔多斯岩石圈的周缘薄弱区上涌,岩石圈发生了减薄并被改造,从而使鄂尔多斯地块北部发生了较大程度的活化与减薄。

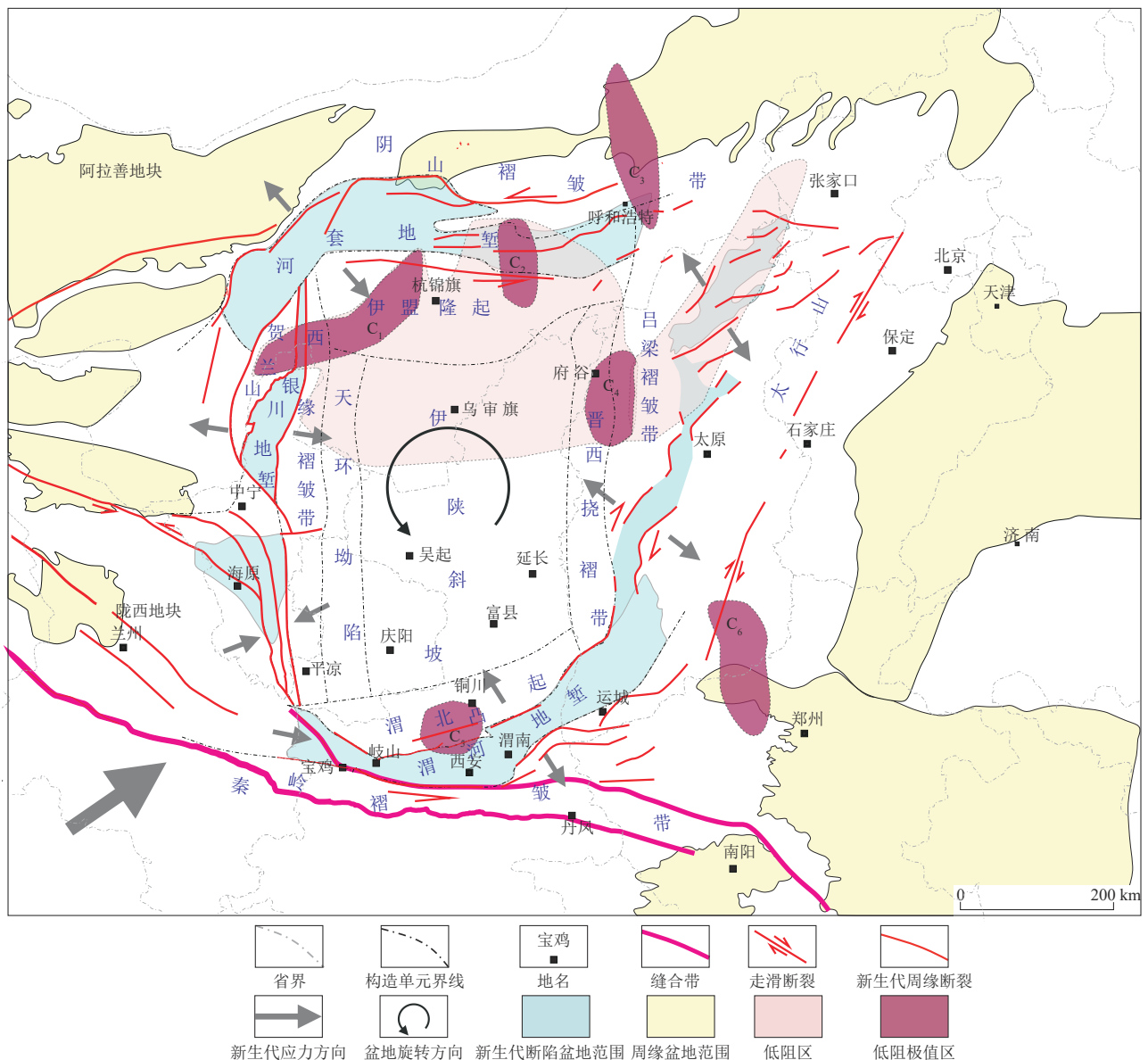


图12 鄂尔多斯地块新生代的逆时针旋转及其北部的“低阻高导体”分布

Fig. 12 Map showing the anti-clockwise rotation of the Ordos Block during the Cenozoic and distribution of low-resistivity and high-conductivity bodies in the northern Ordos Basin

(C_1 — C_6 指低阻高导体,据文献[67-71])

3 结论

1) 鄂尔多斯地块处于华北克拉通西部, 地块内部长城系—白垩系平缓展布, 具有典型的克拉通性质。与华北克拉通东部的破坏相比, 克拉通西部自中元古代以来断裂活动、隆升剥蚀、岩浆活动等体现出一定程度的活动性。

2) 鄂尔多斯地块的活化主要体现在6个方面: ①地块内部或周缘发生了中元古代、寒武纪—早奥陶世、石炭纪—早二叠世、中—晚三叠世与新生代等5期裂谷活动, 裂谷分布不均、伸展强度不一, 从早至晚, 裂谷活动具有从强至弱再增强的特点; ②地块内部发育了中—新元古代、奥陶纪、晚石炭世、中—晚三叠世、早白垩世与中新世晚期—第四纪等6期岩浆活动事件, 尤以长城纪、早白垩世岩浆活动为盛; ③发育中元古代正断层组合、寒武纪—早奥陶世正断层组合、中—晚奥陶世冲断系统、晚石炭世—二叠纪伸展断层系统、晚侏罗世—早白垩世初冲断系统、始新世—第四纪周缘地堑系统和中新世晚期—第四纪西南缘弧形冲断系统等7个时期的断裂系统及其相关褶皱带; ④发育了Ch/AnCh, Jx/AnJx, Z/AnZ, ϵ /An ϵ , O/AnO, C/AnC, T/AnT, J/AnJ, K/AnK, Q/AnQ等10个区域性不整合面, 分布于整个盆地, 多数为构造事件的产物; ⑤经历了中—新元古代、早古生代、石炭纪—三叠纪与侏罗纪—白垩纪等4个构造沉降旋回, 构造沉降具有明显的旋回性与平面差异性, 沉降中心的迁移现象较为普遍, 沉降中心的迁移反映了断裂活动、热冷却沉降与挠曲沉降作用的分区性, 盆地的成因复杂多变, 为多种沉降机制的复杂叠加组合; ⑥新生代, 地块内部与周缘差异性构造活动强烈, 周缘发育地堑系, 内部则隆升剥蚀, 发育黄土高原; 地块周缘边界断裂带常为活动断裂, 发生了一系列强震, 盆地内部北东向断裂带也有一定程度的复活。

3) 鄂尔多斯地块的活化受周缘板块构造背景与深部构造活动的控制。古生代分别受南、北缘特提斯洋与古亚洲洋的打开与关闭的影响, 盆地经历了相应的伸展与聚敛交替作用过程; 中新生代以来, 受(古)太平洋、蒙古—鄂霍茨克洋和新特提斯洋俯冲与关闭的影响, 鄂尔多斯地块发生了强烈的陆内构造变形。早白垩世末期, 鄂尔多斯地块的地壳与岩石圈可能经历了大规模减薄作用, 目前成因不太清楚。新生代晚期, 受青藏高原东北缘挤压的影响, 陇西地块向东南挤出, 鄂尔多斯地块发生了逆时针旋转, 周缘发育了张扭地堑系统, 沿地块周缘薄弱带上地幔物质部分熔融上侵, 鄂

尔多斯地块北部的岩石圈发生明显活化、减薄与改造。

4) 鄂尔多斯地块的活化特点及其成盆意义, 活化事件与油气、煤、盐、铀矿等矿产资源的形成和富集之间的成因联系, 尚需进一步的揭示与深入探讨, 期待同仁们共同关注。

致谢: 本文在写作过程中, 得到了李德生、张国伟、贾承造、王成善等院士的指导。在与刘池洋、罗晓容、刘文汇、陈洪德、刘波、任战利、周进高、金晓辉、高山林等教授的交流中, 受益匪浅, 在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] Richard C S, Roben M C, Ian R P. Encyclopedia of geology [M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005, 175.
- [2] Windley B F. The Evolving Continents [M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [3] Huang T K. An outline of the tectonic characteristics of China [M]. Eclogae Geologicae Helvetiae, 1978.
- [4] Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. An outline of the tectonic evolution of China [J]. Episodes, 1995, 18(1, 2): 6–16.
- [5] Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, et al. The tectonics of China from a global view a guide to the tectonic map of China and adjacent regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [6] Ma Lifang, Qiao Xiufu, Min Longrui, et al. Geological Atlas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [7] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
He Zixin. Ordos basin evolution and oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [8] Zhao Guochun. Precambrian evolution of the North China Craton [M]. Oxford: Elsevier, 2013.
- [9] 翟明国. 鄂尔多斯地块是破解华北早期大陆形成演化和构造体制谜团的钥匙 [J]. 科学通报, 2021, 66(26): 3441–3461.
Zhai Mingguo. Ordos Block (Basin) is a key to understand early continental evolution and tectonic regime of the North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(26): 3441–3461.
- [10] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性 [J]. 地质学报, 2005, 79(6): 737–747.
Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Feng, et al. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 737–747.
- [11] 刘池洋, 王建强, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存—成藏特点 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1011–1029.
Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011–1029.
- [12] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征 [J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1255–1269.
He Dengfa, Bao Hongping, Baize Kai, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and

- adjacent area[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2021, 42(10): 1255–1269.
- [13] Walther Penck. Morphological analysis of land forms: A contribution to physical geology [M]. London: Macmillan and Co., Limited St. Martin's street, 1953.
- [14] 陈国达. 中国地台“活化区”的实例并着重讨论“华夏古陆”问题[J]. *地质学报*, 1956, 36: 239–271.
- Chen Guoda Examples of “Activizing Region” in the Chinese platform with special reference to the “Cathaysia” problem (in Chinese with English abstract) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1956, 36: 239–271.
- [15] 陈国达. “燕山运动”的历史意义[J]. *大地构造与成矿学*, 1992, 16: 111–112.
- Chen Guoda. Historical significance of the “Yanshanian Orogeny” (in Chinese) [J]. *Geotect Metall*, 1992, 16: 111–112.
- [16] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(5): 583–592.
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, et al. Timing, scale, and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. *Science China: Earth Science*, 2011, 41(5): 583–592.
- [17] 张成立, 苟龙龙, 第五春荣, 等. 华北克拉通西部基底早前寒武纪地质事件、性质及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(4): 981–998.
- Zhang Chengli, Gou Longlong, Diwu Chunrong, et al. Early Precambrian geological events of the basement in Western Block of North China Craton and their properties and geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(4): 981–998.
- [18] 孙枢, 从柏林, 李继亮. 豫陕中晚元古代沉积盆地(一)[J]. *地质科学*, 1981, 16(4): 314–322.
- Sun Shu, Cong Bailing, Li Jiliang. Evolution of the Henan-Shanxi sedimentary basin of the Middle and Late Proterozoic age (Part I) [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1981, 16(4): 314–322.
- [19] 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(22): 2342–2349.
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, et al. Shrimp chronology of zircon from Xiong'er Group volcanic rocks: Constraints on the initial time of caprock development in North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(22): 2342–2349.
- [20] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界-寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(11): 1–13.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(11): 1–13.
- [21] 王坤, 王铜山, 汪泽成, 等. 华北克拉通南缘长城系裂谷特征与油气地质条件[J]. *石油学报*, 2018, 39(5): 504–517.
- Wang Kun, Wang Tongshan, Wang Zecheng, et al. Characteristics and hydrocarbon geological conditions of the Changchengian rifts in the southern North China Craton [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2018, 39(5): 504–517.
- [22] 孙国凡, 刘景平. 贺兰拗拉槽与前渊盆地及其演化[J]. *石油与天然气地质*, 1983, 4(3): 236–245.
- Sun Guofan, Liu Jingping. Helan aulacogen and front basin and their evolution [J]. *Oil & Gas Geology*, 1983, 4(3): 236–245.
- [23] 林畅松, 杨起, 李思田. 贺兰拗拉槽盆地充填演化分析[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1–143.
- Lin Changsong, Yang Qi, Li Sitian. Analysis of filling evolution in Helan Aulacogen Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 1–143.
- [24] 白海峰, 包洪平, 李泽敏, 等. 鄂尔多斯盆地元古界长城系沉积特征及天然气成藏潜力[J]. *地质科学*, 2020, 55(3): 672–691.
- Bai Haifeng, Bao Hongping, Li Zemin, et al. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of Changcheng System in Ordos Basin in Proterozoic [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(3): 672–691.
- [25] 王志宁. 贺兰山镁铁质岩石年代学、地球化学及其构造意义[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- Wang Zhining. Chronology, geochemistry and tectonic significance of mafic rocks in Helanshan Mountains [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [26] 董云鹏, 张国伟, 孙圣思, 等. 中国大陆“十字构造”形成演化及其大陆动力学意义[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 769–797.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Sun Shengsi, et al. The “Cross-Tectonics” in China continent: formation, evolution, and its significance for continental dynamics [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 769–797.
- [27] 董云鹏, 李玮, 张菲菲, 等. 南北构造带北段贺兰山的形成与演化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 951–968.
- Dong yunpeng, Li Wei, Zhang Feifei, et al. Formation and evolution of Helanshan Mountains, the northern segment of North-south tectonic belt [J]. *Northwest University Bulletin (Natural Science)*, 2021, 51(6): 951–968.
- [28] 张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 等. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 639–647.
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Liao Changzhen, et al. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, North China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 639–647.
- [29] 邸领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 34–37.
- Di Lingjun, Zhang Dongyang, Wang Hongke. Primary discussion on Himalayan tectonic movement and petroleum reservoir in Ordos Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2003, 24(2): 34–37.
- [30] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶纪火山活动记录: 来自陕甘地区平凉组钾质斑脱岩地球化学和锆石年代学的信息[J]. *岩石学报*, 2015, 31(9): 2633–2654.
- Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Volcanic event records at the southwestern Ordos Basin: the message from geochemical and zircon U-Pb geochronology of K-bentonites from Pingliang Formation, Shaanxi and Gansu region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(9): 2633–2654.
- [31] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群耦合作用[J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 1990–2004.
- Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Ordovician geological events group in the west and south Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 1990–2004.
- [32] 吴素娟, 张永生, 邢恩袁. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶纪凝灰岩

- 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义 [J]. 地质论评, 2017, 63(5): 1309-1327.
- Wu Sujuan, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of tuff in Wulalike Formation in the northwestern Ordos Basin [J]. Geological Review, 2017, 63(5): 1309-1327.
- [33] 杨鹏, 任战利, Zhao Jianxin, 等. 方解石原位 U-Pb 测年结合磷灰石裂变径迹方法约束鄂尔多斯盆地西南部构造演化 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1189-1201.
- Yang Peng, Ren Zhanli, Zhao Jianxin, et al. Tectonic evolution analysis constrained jointly by in-situ calcite U-Pb dating and apatite fission track for southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1189-1201.
- [34] 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [35] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling Orogen, China: Review and synthesis [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(3): 213-237.
- [36] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling Orogen: evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks [J]. Lithos, 2011, 122(1/2): 39-56.
- [37] 岳远刚, 董云鹏, 王润三, 等. 贺兰山汝箕沟玄武岩地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质科学, 2018, 53(3): 1157-1170.
- Yue Yuangang, Dong Yunpeng, Wang Runsan, et al. Geochemical characteristics and their geological implications of the basalt from the Rujigou area, Helan Mountain [J]. Chinese Journal of Geology, 2018, 53(3): 1157-1170.
- [38] 张文正, 杨华, 彭平安, 等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩发育的影响 [J]. 地球化学, 2009, 38(6): 573-582.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Pingan, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.
- [39] Qiu X W, Liu C Y, Mao G Z, et al. Late Triassic tuff intervals in the Ordos basin, Central China: Their depositional, petrographic, geochemical characteristics and regional implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 80, 148-160.
- [40] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936-946.
- Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 936-946.
- [41] 杨华, 付金华, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地西缘晚三叠世构造-沉积环境分析 [J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 427-439.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Ouyang Zhengjian, et al. Analysis of tectonic-sedimentary setting in Middle and Upper Triassic in the west margin of the Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 427-439.
- [42] 高山林, 李芳, 李天斌, 等. 汝箕沟晚中生代玄武岩的确定与煤变质作用关系简论 [J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 8-10.
- Gao Shanlin, Li Fang, Li Tianbin, et al. Discussion of the relationship between coal metamorphism and the Late Mesozoic basalt in Rujigou area [J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 8-10.
- [43] 杨华, 付金华, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地西缘汝箕沟大岭—鼓鼓台玄武岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义 [J]. 地球学报, 2010, 31(2): 229-236.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Ouyang Zhengjian, et al. U-Pb zircon dating of the Daling-Gugutai basalt in Rujigou on the western margin of Ordos Basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(2): 229-236.
- [44] 王锋, 刘池阳, 杨兴科, 等. 贺兰山汝箕沟玄武岩地质地球化学特征及其构造环境意义 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(4): 25-27.
- Wang Feng, Liu Chiyang, Yang Xingke, et al. Geologic geochemical features of basalt in Ruqi clough of Helan Mountain and its structural environmental significance [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(4): 25-27.
- [45] 邹和平, 张珂, 李刚. 鄂尔多斯地块早白垩世构造-热事件: 杭锦旗玄武岩的 Ar-Ar 年代学证据 [J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 360-364.
- Zou Heping, Zhang Ke, Li Gang. Cretaceous tectono-thermal event in the Ordos block: An Ar-Ar chronological evidence from basalt at Hangjin Banner, Inner Mongolia, North China craton [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(3): 360-364.
- [46] 邹和平, 张珂, 刘玉亮, 等. 鄂尔多斯地块北部中、新生代玄武岩地球化学特征及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(1): 92-104.
- Zou Heping, Zhang Ke, Liu Yuliang, et al. Geochemical characteristics and their geological implications of Meso-Cenozoic basalts in the northern Ordos Block, North China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(1): 92-104.
- [47] 肖媛媛, 任战利, 秦江峰, 等. 山西临县紫金山碱性杂岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质论评, 2007, 53(5): 656-663.
- Xiao Yuanyuan, Ren Zhanli, Qin Jiangfeng, et al. Geochemistry and zircon LA-ICP MS U-Pb dating of the Zijinshan alkaline complex in the Linxian County, Shanxi Province: geological implication [J]. Geological Review, 2007, 53(5): 656-663.
- [48] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3731-3741.
- Chen Gang, Ding Chao, Xu Liming, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos Basin [J]. Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3731-3741.
- [49] 张宏法, 包洪平, 彭天朗, 等. 鄂尔多斯盆地西南边部超钾质岩及构造意义 [J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1172-1182.
- Zhang Hongfa, Bao Hongping, Peng Tianlang, et al. The ultra-potassic rocks on the southwestern margin of the Ordos Basin and their tectonic significance [J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1172-1182.
- [50] 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 早古生代阿拉善地块与华北地块之

- 间的关系:来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. 岩石学报,2012,28(9):2912-2934.
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, et al. The relationship between the Alxa block and the North China plate during the Early Paleozoic: new information from the Middle Ordovician detrital zircon ages in the eastern Alxa block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012,28(9):2912-2934.
- [51] 汤锡元,郭忠铭,王定一. 鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带特征及其演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质,1988,9(1):1-10.
- Tang Xiyuan, Guo Zhongming, Wang Dingyi. The characteristics and evolution of the thrust nappe tectonic belt and its petroleum potential in the west Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1988,9(1):1-10.
- [52] 彭希龄. 有关陕北盆地西部边缘的一些构造问题[J]. 地质学报,1955,35(4):405-417.
- Peng Xiling. Some tectonic problems concerning the western limit of the North-Shaanxi Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1955,35(4):405-417.
- [53] 赵重远. 鄂尔多斯地块西缘构造单位划分及构造展布格局和形成机制[C]//杨俊杰. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带构造与油气. 兰州:甘肃科学技术出版社,1990:40-53.
- Zhao Chongyuan. Division of the western Ordos thrust belt and its mechanism [C]//Yang Junjie. The Structures, Oil and Gas of Western Ordos Basin. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1990:40-53.
- [54] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地西缘掩冲带构造与油气[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1990:91-105.
- Yang Junjie. Structures and oil and gas in the thrust zone on the western margin of Ordos Basin [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1990:91-105.
- [55] 汤锡元,郭忠铭,陈荷立. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[M]. 西安:西北大学出版社,1992:1-156.
- Tang Xiyuan, Guo Zhongming, Chen Heli. The study and petroleum prospect of thrust nappe in the west margin of Shanxi-Gansu-Ningxia Basin [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992:1-156.
- [56] Darby J, Ritts B D. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: The intraplate Western Ordos fold-thrust belt, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002,205(1/2):13-24.
- [57] 万丛礼,付金华,张军. 鄂尔多斯西缘前陆盆地构造-热事件与油气运移[J]. 地球科学与环境学报,2005,27(2):43-47.
- Wan Congli, Fu Jinhua, Zhang Jun. Tectono-thermal event in west foreland basin of Ordos and its effects on oil-gas migration [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005,27(2):43-47.
- [58] 王锋,刘池阳,赵红格. 鄂尔多斯盆地西部陆内前陆盆地的晚期发育与油气聚集[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(1):46-47.
- Wang Feng, Liu Chiyang, Zhao Hongge. Later stage development and hydrocarbon accumulation of intracontinental foreland basin in western Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing*, 2006,25(1):46-47.
- [59] Darby J, Ritts B D. Mesozoic structural architecture of the Lang Shan, North-Central China: Intraplate contraction, extension, and synorogenic sedimentation [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007,29(12):2006-2016.
- [60] 张岳桥,廖昌珍,施炜,等. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形[J]. 地学前缘,2007,4(2):182-196.
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, et al. On the Jurassic deformation in and around the Ordos Basin, North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007,14(2):182-196.
- [61] 陈刚,王志维,白国娟,等. 鄂尔多斯盆地中新生代峰值年龄事件及其沉积-构造响应[J]. 中国地质,2007,34(3):375-383.
- Chen Gang, Wang Zhiwei, Bai Guojuan, et al. Meso-Cenozoic peak-age events and their tectono-sedimentary response in the Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2007,34(3):375-383.
- [62] 杨圣彬,耿新霞,郭庆银,等. 鄂尔多斯盆地西缘北段中生代构造演化[J]. 地质论评,2008,54(3):307-315.
- Yang Shengbin, Geng Xinxia, Guo Qingyin, et al. Mesozoic tectonic evolution in north section of the western margin of Ordos Basin [J]. *Geological Review*, 2008,54(3):307-315.
- [63] 张家声,何自新,费安琪,等. 鄂尔多斯西缘北段大型陆缘逆冲推覆体系[J]. 地质科学,2008,43(2):251-281.
- Zhang Jiasheng, He Zixin, Fei Anqi, et al. Epicontinental mega thrust and nappe system at north segment of the western rim of the Ordos block [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008,43(2):251-281.
- [64] 何登发,邵东波,开百泽,等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律[J]. 地球学报,2019,40(1):219-235.
- He Dengfa, Shao Dongbao, Kai Baize, et al. The tectonic style and trap distribution rules of Majiatan area on the western edge of Ordos Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2019,40(1):219-235.
- [65] 马静辉,何登发. 贺兰山构造带及邻区中-新生代构造事件:来自不整合面和裂变径迹的约束[J]. 岩石学报,2019,35(4):1121-1142.
- Ma Jinghui, He Dengfa. Meso-Cenozoic tectonic events in the Helanshan tectonic belt and its adjacent areas: constraints from unconformity and fission track data [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019,35(4):1121-1142.
- [66] Zhang J, Qu J F, Zhang B H, et al. Mesozoic intraplate deformation of the central North China Craton: Mechanism and tectonic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020,192(C).
- [67] Zhang J, Wang Y N, Qu J F, et al. Mesozoic intracontinental deformation of the Alxa Block in the middle part of Central Asian Orogenic Belt: A review [J]. *International Geology Review*, 2021,63(12):1490-1520.
- [68] Huang X F, Shi W, Chen P, et al. Superposed deformation in the Helanshan structural belt: Implications for Mesozoic intracontinental deformation of the North China plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015,114:140-154.
- [69] Yang X Y, Dong Y P. Mesozoic and Cenozoic multiple deformations in the Helanshan tectonic belt, Northern China [J]. *Gondwana Research*, 2018,60:34-53.
- [70] Huang X F, Feng S Y, Gao R, et al. High-resolution crustal structure of the Yinchuan basin revealed by deep seismic reflection profiling: Implications for deep processes of basin [J]. *Earthquake*

- Science, 2016, 29(2): 83-92.
- [71] Liu X B, Hu J M, Shi W, et al. Palaeogene-Neogene sedimentary and tectonic evolution of the Yinchuan Basin, western North China Craton [J]. *International Geology Review*, 2020, 62(1): 53-71.
- [72] 赵俊峰, 刘池洋, 王晓梅, 等. 吕梁山地区中新世隆升演化探讨 [J]. *地质论评*, 2009, 55(5): 663-672.
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Wang Xiaomei, et al. Uplifting and evolution characteristics in the Lüliang mountain and its adjacent area during the Meso-Cenozoic [J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 663-672.
- [73] 黄志刚, 郑庆荣, 孙二虎, 等. 吕梁山地区中北段元古代花岗岩体隆升演化的裂变径迹证据 [J]. *地质学报*, 2018, 92(6): 1216-1227.
- Huang Zhigang, Zheng Qingrong, Sun Erhu, et al. Fission track evidence of tectonic evolution of the Paleoproterozoic granitic pluton in the north-central part of Lüliang mountain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(6): 1216-1227.
- [74] 张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代-新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造 [J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 28-40.
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 28-40.
- [75] 黄志刚, 任战利, 高龙刚. 鄂尔多斯盆地东南缘白垩纪以来构造演化的裂变径迹证据 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(10): 3753-3764.
- Huang Zhigang, Ren Zhanli, Gao Longgang. Evidence from detrital zircon and apatite fission track for tectonic evolution since Cretaceous in southeastern margin of Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3753-3764.
- [76] Tian Xiaobo, Bai Zhiming, Simon L, et al. Crustal-scale wedge tectonics at the narrow boundary between the Tibetan Plateau and Ordos block [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, Vol. 554: 116700.
- [77] 宋莫南. 对怀远运动的再认识 [J]. *山东地质*, 2001, 17(1): 19-23, 51.
- Song Diannan. Recognition of Huaiyuan Movement [J]. *Shandong Land and Resources*, 2001, 17(1): 19-23, 51.
- [78] 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 44-60.
- Guo Yanru, Zhao Zhenyu, Xu Wanglin, et al. Sequence stratigraphy of the Ordovician system in the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 44-60.
- [79] 李相博, 王宏波, 黄军平, 等. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1043-1055.
- Li Xiangbo, Wang Hongbo, Huang Junping, et al. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1043-1055.
- [80] 邓秀芹, 罗安湘, 张忠义, 等. 秦岭造山带与鄂尔多斯盆地印支期构造事件年代学对比 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 939-953.
- Deng Xiuqin, Luo Anxiang, Zhang Zhongyi, et al. Geochronological comparison on Indosinian tectonic events between Qinling Orogeny and Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 939-953.
- [81] Li Xiyao, Zheng Jianping, Li Sanzhong, et al. Late Triassic orogenic collapse and Palaeo-Pacific slab roll-back beneath central South China: constraints from mafic granulite xenoliths and structural features [J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 123-136.
- [82] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义 [J]. *中国地质科学院院报*, 1984, 6(2): 31-44.
- Ren Jishun. The Indo-Branch Movement and its significance in the geotectonic evolution in China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1984, 6(2): 31-44.
- [83] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应 [J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-638.
- [84] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释 [J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1449-1461.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [85] 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征 [J]. *地球学报*, 2008, 29(3): 306-317.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Chen Xuanhua, et al. The formation and deformational characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 306-317.
- [86] Xiao Wenjiao, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1316-1341.
- [87] Xiao Wenjiao, Windley B F, Sun Shu, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: oroclinal sutures, and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477-507.
- [88] Liu Liang, Liao Xiaoying, Wang Yawei, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on continental deep subduction and multiphase exhumation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 58-81.
- [89] Sun J P, Dong Y P. Cambrian tectonic evolution of the northwestern Ordos Terrane, North China: Constraints of stratigraphy, sedimentology and zircon U-Pb geochronology [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2019, 108(2): 569-586.
- [90] Sun J P, Dong Y P. Ordovician tectonic shift in the western North China Craton constrained by stratigraphic and geochronological analyses [J]. *Basin Research*, 2020, 32(6): 1413-1440.
- [91] Sun J P, Dong Y P. Stratigraphy and geochronology of Permo-Carboniferous strata in the Western North China Craton: Insights into the tectonic evolution of the southern Paleo-Asian Ocean [J]. *Gondwana Research*, 2020, 88: 201-219.
- [92] Meng Q R, Wu G L, Fan L G, et al. Late Triassic uplift, magmatism and extension of the northern North China block: Mantle signatures in the surface [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 547.

- [93] Sun J P, Dong Y P. Middle-Late Triassic sedimentation in the Helanshan Tectonic Belt: Constrains on the tectono-sedimentary evolution of the Ordos Basin, North China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(1): 213–227.
- [94] 王瑜, 孙立新, 周丽云, 等. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48: 521–535.
Wang Yu, Sun Lixin, Zhou Liyun, et al. Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61: 521–535.
- [95] 刘少峰, 杨士恭. 鄂尔多斯盆地西缘南北差异及其形成机制 [J]. *地质科学*, 1997, 32(3): 397–408.
Liu Shaofeng, Yang Shigong. The differences between the southwestern and the northwestern Ordos Basin and their forming mechanism [J]. *Science Geologica Sinica*, 1997, 32(3): 397–408.
- [96] Cogn J P, Kravchinsky A, Halim N, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Bakal area (SE Siberia) [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(2): 813–832.
- [97] Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 750–770.
- [98] 赵晓辰. 中国南北构造带北部中生代构造演化与后期改造 [D]. 西安: 西北大学, 2017.
Zhao Xiaochen. Mesozoic tectonic evolution and late reformation of the northern north-south tectonic Belt, China [D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [99] 任战利, 崔军平, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造-热演化史恢复 [J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2044–2056.
Ren Zhanli, Cui Junping, Li Jinpu, et al. Tectonic-thermal history reconstruction of Ordovician in the Weibei uplift of Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11): 2044–2056.
- [100] 任战利, 祁凯, 刘润川, 等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用 [J]. *岩石学报*, 2020, 36(4): 1213–1234.
Ren Zhanli, Qi Kai, Liu Runchuan, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(4): 1213–1234.
- [101] Qi Kai, Zhanli Ren, Junping Cui, et al. Meso-Cenozoic lithospheric thermal structure and its significance in the evolution of the lithosphere in the Ordos Basin, WNCC, China [J]. *International Geology Review*, 2020, 63(17): 2146–2165.
- [102] Tang Y C, Chen Y J, Zhou S Y, et al. Lithosphere structure and thickness beneath the North China Craton from joint inversion of ambient noise and surface wave tomography [J]. *Geophys Res-Solid Earth*, 2013, 118(5): 2333–2346.
- [103] 吕宏斌, 叶高峰, 金胜, 等. 鄂尔多斯地块-扬子地块深部电性结构特征及其动力学意义 [J]. *地质论评* 2020, 66(4): 813–828.
Lyu Hongbin, Ye Gaofeng, Jin Sheng, et al. Deep electrical structure characteristics of Ordos Block-Yangtze Block and their dynamic significance [J]. *Geological Review*, 2020, 66(4): 813–828.
- [104] Dong H, Wei W, Ye G, et al. Three-dimensional electrical structure of the crust and upper mantle in Ordos Block and adjacent area: Evidence of regional lithospheric modification [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, 2014, 15(6): 2414–2425.
- [105] Zhang H, Huang Q, Zhao G, et al. Three-dimensional conductivity model of crust and uppermost mantle at the northern Trans North China Orogen: Evidence for a mantle source of Datong volcanoes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 453(1): 182–192.
- [106] 陈洁, 陈永顺, 郭震, 等. 沿 107.6°E 南北向剖面鄂尔多斯地块及周缘地区地壳结构 [J]. *地球物理学报*, 2020, 63(7): 2592–2604.
Chen J, Chen Y S, Guo Z, et al. Crustal structure of the Ordos block and adjacent regions along an N-S profile of 107.6°E [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(7): 2592–2604.
- [107] 胡祥云, 林武乐, 杨文采, 等. 克拉通岩石圈电性结构研究进展 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(11): 1533–1552.
Hu Xiangyun, Lin Wule, Yang Wencai, et al. A review on developments in the electrical structure of craton lithosphere [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(11): 1661–1677.
- [108] 殷伟伟, 雷建设, 黄金刚, 等. 山西断陷带上地幔顶部 Pn 波速度结构与各向异性成像 [J]. *地球物理学报*, 2020, 63(12): 4382–4395.
Yin Weiwei, Lei Jianshe, Huang Jingang, et al. Pn velocity and anisotropic upper most mantle tomography in and around the Shanxi rift zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(12): 4382–4395.
- [109] Yin Y, Jin S, Wei W, et al. Lithospheric rheological heterogeneity across an intraplate rift basin (Linfen Basin, North China) constrained from magnetotelluric data: Implications for seismicity and rift evolution [J]. *Tectonophysics*, 2017, 717: 1–15.
- [110] Wang C Y, Sandvol E, Zhu L, et al. Lateral variation of crustal structure in the Ordos block and surrounding regions, North China, and its tectonic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 387: 198–211.
- [111] 国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1988.
Project on active fault system around the Ordos Basin of National Seismological Bureau. Active fault systems around the Ordos Block [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1988.
- [112] 邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学讨论 [J]. *地质力学学报*, 1999, 5: 13–21.
Deng Qidong, Cheng Shaoping, Min Wei, et al. Discussion on Cenozoic tectonic movement and dynamics of the Ordos Block [J]. *Bulletin on Geo-mechanics*, 1999, 5: 13–21.
- [113] 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 等. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(3): 285–297.
Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, et al. Neo-tectonic evolution and regional geodynamic setting at the periphery belts of Ordos Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(3): 285–297.