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

翟明国^{1,2,3,4}

1. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

3. 西北大学地质学系, 西安 710069;

4. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

2021-01-27 收稿, 2021-03-05 修回, 2021-03-05 接受, 2021-03-08 网络版发表

国家自然科学基金(41890834)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC017)和中国科学院国际伙伴计划项目(Y909208092)资助

摘要 鄂尔多斯地块是华北克拉通的核心地质单元之一。前寒武纪基底陆块的划分、克拉通化过程与构造机制、古元古代活动带、中-新元古代的多期裂谷和壳幔调整、华北地台形成等华北早期大陆的几乎所有重要科学问题, 都与鄂尔多斯地块密切相关。近年来鄂尔多斯地块的油气和煤资源的研究有重要突破, 带动基础地质研究至少在三方面有重要进展: (1) 大鄂尔多斯盆地的演化历史; (2) 狭义鄂尔多斯盆地的基底以及与周边基底岩石的对比; (3) 鄂尔多斯地块的周边断裂及其性质。这些都说明鄂尔多斯地块是在原有华北克拉通基底上发展起来的大盆地, 现在的狭义盆地面貌是在三叠纪末开始形成, 并在中-新生代才逐步改造定格的。因此对华北克拉通早期大陆的形成和演化历史, 需要抛开固有的想法, 客观分析地质资料, 给予科学解读。鄂尔多斯地块是破解华北早期大陆形成和构造体制演化谜团的钥匙。

关键词 鄂尔多斯, 周缘基底, 边界断裂, 华北古陆, 构造意义

鄂尔多斯地块位于华北克拉通的西部, 是华北克拉通的核心地质单元之一。打开地质图来看, 前寒武纪岩石的出露大致呈工字型, 即沿华北的南、北缘以及中部即豫晋蒙的中条山、吕梁山、太行山一带出露。此外, 在东部即鲁西、胶北至辽东、辽北(吉南)也成带分布。西部的鄂尔多斯盆地和东部的华北盆地像两个小的波斯毯盖在华北克拉通这个大宴会餐桌上, 未覆盖的部分就是出露的基底岩石(图1)^[1,2]。有研究将中部出露的基底岩石称为中部造山带^[3], 由此将华北克拉通分成西部陆块和东部陆块; 我们根据古元古代变质火山-沉积岩系的分布, 划分出晋豫(中部)、丰镇(北部)和胶辽吉(东部)活动带^[4,5]。华北克拉通的长达38亿年的

地质演化历史, 包括出现最古老的陆壳岩石、克拉通化和地台形成, 到中-新生代的克拉通破坏和岩石圈减薄, 大都围绕着鄂尔多斯地块来讲故事。对于早前寒武纪地质演化而言, 20世纪80~90年代初有一些较有影响的多块体拼合与克拉通多阶段生长的论述发表, 它们对鄂尔多斯地块都很关注^[6~10]。在后来的研究中鄂尔多斯地块更是被作为独立的古老陆块。例如, Zhao等人^[3]提出的模式: 鄂尔多斯地块代表西部陆块, 东西陆块沿中部造山带在18亿年左右拼合成华北克拉通, 中部带的西界是离石断裂, 东界是太行山前断裂。Kusky等人^[11]提出在25亿年华北的东部陆块和西部陆块拼合, 西部陆块也是鄂尔多斯地块, 中部造山带是由从辽西

引用格式: 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. 科学通报, 2021, 66: 3441–3461

Zhai M G. Ordos Block (Basin) is a key to understand early continental evolution and tectonic regime of the North China Craton (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3441–3461, doi: 10.1360/TB-2021-0113

图1 华北克拉通早前寒武纪变质基底出露示意图(a)和前寒武纪岩石出露示意图(b)^[1,2]

Figure 1 Sketch map showing distribution of early Precambrian metamorphic basement (a) and distribution of Precambrian rocks (b) in the North China Craton^[1,2]

冀东的遵化杂岩,向西的五台杂岩以及向南的太行山赞皇杂岩组成,它们代表新太古代蛇绿混杂岩带;内蒙古-冀北出露的古元古代变质的含泥质岩的麻粒岩带(孔兹岩系)代表的是北部陆块与东西陆块拼合后的华北克拉通碰撞的古元古代造山事件,称为内蒙-冀北造山带。Santosh等人^[12]双向俯冲的多块体拼合模式则认为,东部陆块和北部陆块分别在古元古代向鄂尔多斯代表的西部陆块俯冲,并与全球范围的(奴那)哥伦比亚超大陆相关。对于鄂尔多斯地块的周边断裂,现有研究确定它们自晚白垩世至全新世有多次叠加和活动,是引发地震的活动断层^[13,14]。这些断层地球物理性质的三维图像也被一些研究者解释为是古元古代东部陆块向鄂尔多斯地块为代表的西部陆块俯冲-碰撞^[15]或者是西部陆块向北部陆块(阴山或西伯利亚)俯冲-碰撞^[16]的深部证据。

在过去和现在的研究中,鄂尔多斯地块和鄂尔多斯盆地的名词使用都非常普遍。使用鄂尔多斯盆地,主要讨论盆地的形成和性质、元古宙以来至今的演化历史及其油气资源问题。使用鄂尔多斯地块,是把它看作一个稳定的具陆块性质的地质单元,或是华北克拉通的一部分、或是独立的古老陆块。本文在讨论盆地的形成演化时称其为盆地,在讨论它在华北大陆形成演化的意义时,将其视为一个古老的地块并称为鄂尔多斯地块。

近几年,在狭义的鄂尔多斯盆地内的石油钻井岩心样品中陆续发现了一些古老的变质岩。这些岩石包括花岗质片麻岩和角闪岩-麻粒岩相变质的含泥质岩

的沉积岩系(孔兹岩系),它们的岩石学、变质作用和年代学特征与其北侧的大青山-乌拉山以及东侧的中条山、吕梁山基底岩石非常类似^[17~24]。同时,在鄂尔多斯周边断裂临近的地方也发现了一些花岗片麻岩、辉长岩和变质沉积岩^[25~28],似乎指示鄂尔多斯与华北克拉通东部和北部陆块有着相似的基底岩石组成以及演化历史。这些资料使我们不得不重新梳理地质资料和思考华北克拉通的陆壳形成生长过程以及演化历史。

值得指出的是,由于鄂尔多斯地块是我国重要的油气和煤炭资源基地,详细的地质和勘探资料积累很多,研究也有重要进展,特别是有关中生代以来鄂尔多斯盆地的性质、形成背景和盆地演化等方面有很多新成果^[29~43]。地球物理的研究在鄂尔多斯盆地分布范围、边界断裂及其变化过程、鄂尔多斯的基底结构和状态,以及深部动力学过程诸方面进展很大^[44~48],这为进一步认识和理解华北克拉通的早期物质、结构组成和构造演化提供了重要的帮助。以上进展至少说明,鄂尔多斯地块曾经是在原有华北克拉通基底上发展起来的大盆地,现在的狭义盆地是在晚三叠世以来开始形成并在中-新生代逐步改造成现在的面貌。因此对华北克拉通早期大陆的形成和演化历史,需要抛开固有的想法,客观分析地质资料,给予科学解读。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。

1 鄂尔多斯盆地的演化简史

鄂尔多斯盆地是在太古宙-古元古代结晶基底之上

发育起来的一个多旋回叠合盆地。总体上,周边的早前寒武纪岩石地层单元与华北克拉通典型同时代岩石地层单元是可以对比的^[30,42~52]。盆地主体具克拉通内盆地特征^[30~35]。早前寒武纪的变质岩系是克拉通盆地的结晶基底,主要由新太古代-古元古代变质岩系构成。基底岩石在盆地周缘有广泛的出露,地层和岩群的称呼因地而异^[50,51],如东缘的新太古代阜平群、界河口群、涑水群、五台群、太华群,以及古元古代的吕梁群、绛县群、滹沱群、岚河群、中条群等;北缘有新太古代-古元古代的集宁群、乌拉山群、色尔腾山群、二道凹群等;西缘则有贺兰山群、千里山群、赵池沟群、海原群等^[42,50,51]。也有研究认为,具有孔兹岩系特征的古元古代变质沉积岩组合如乌拉山区群、贺兰山群等就是最早的克拉通内盆地沉积岩系^[36];多数研究认为,形成于中、新元古代的长城系、蓟县系及震旦系沉积层是盆地最早期的沉积地层^[42]。

鄂尔多斯本部的基底结构可以按构造走向粗略地划分为北部、西北部及中南部三大区^[42]。北部以乌拉山群为主,大体呈近东西走向;西北部以贺兰山群为主,大致呈北北东走向;中南部则分别由集宁群、吕梁群、太华群构成,都呈北东走向,形成盆地基底结构的主体。从地震、重力及航磁异常综合反映的盆地基底断裂分布特征看,鄂尔多斯盆地基底构造的走向总体呈现北东向,尤其是在盆地本部地区,它们与盆地现今构造走向以及古生代和中生代各期构造的主体走向均不一致,但与中、新元古界的主体构造方向有一定的一致性,说明中、新元古代构造格局与基底构造可能具有一定的继承性。中新元古代沉积地层发育阶段,按照构造-沉积演化的总体特征可划分为长城纪陆内裂陷、蓟县纪边部沉降、青白口纪-南华纪整体隆升和震旦纪边缘拗陷4个主要的演化阶段。震旦纪总体表现出鄂尔多斯主体随大华北地块整体构造隆升,而西南边缘则发生局部拗陷的区域构造背景。边缘拗陷可能代表了块体边缘基底构造的再次活化,也是早古生代鄂尔多斯西缘及南缘边缘海槽逐步开始发育的前奏,因而西缘及南缘地区的下古生界寒武系及奥陶系也是明显厚于盆地本部地区。盆地内不同时代的沉积地层发育时代较全,除了有古元古代晚期-中新元古代的长城系、蓟县系之外,下古生界寒武系、奥陶系,上古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系、白垩系,新生界古近系、新近系、第四系也都有出露。青白口系-南华系在盆地本部基本缺失,震旦系仅在盆地西缘

及南缘的局部地区有零星分布,整体缺失志留系、泥盆系、上奥陶统及下石炭统,沉积岩平均厚度约为6000 m。根据地质和地球物理资料以及油气钻机岩心等资料综合,鄂尔多斯盆地还被分为北部伊盟隆起、中部陕北斜坡、南部渭北隆起区;在东缘还分出晋西褶皱带,在西缘分出天环凹陷和西部折冲断层带^[14]。

对于大鄂尔多斯盆地形成的构造背景一般认为与我国东部受周边板块构造影响的格局有关,特别是南北造山带共同作用的结果^[37~42]。扬子陆块与华北陆块的拼合始于二叠纪末-三叠纪初而终于早白垩世,整体是一个自东向西的碰撞拼合过程,而北部的兴蒙造山带与华北陆块碰撞拼合的时代可能更早,在中-晚三叠世趋于平静。二叠纪-白垩纪古秦岭洋逐渐关闭。这一大规模的构造挤压过程不仅使华北板块南缘发生了大规模隆升并供源,同时板块南部伴生发育一些挠曲变形,构成了沉积汇聚区。地层对比研究表明,该套三叠系沉积与延长组下部的SQ1、SQ2旋回沉积地层可相对比,说明该区在早三叠世为暴露剥蚀环境,到中-晚三叠世快速演变为湖泊沉积环境。SQ2晚期和SQ3旋回显示沉积容积最大,是沉降期。SQ4旋回发育在湖泊演化的后期/关闭阶段,晚三叠世的印支运动导致盆地整体抬升,盆内大部分地区遭受了不同程度的侵蚀作用,尤其在盆地边缘地区剥蚀更为严重,甚至地层完全缺失。这种古地貌巨变及其发生的时间节点暗示了其受秦岭东段造山演化的控制。盆地沉积中心向西北迁移和盆内古地理格局变化是对华北-扬子陆块拼合的响应。Meng等人^[43,44]则认为大鄂尔多斯盆地的形成,很大程度受到鄂霍茨克洋演化的控制。中亚(兴蒙)造山带的造山活动早已经在早三叠世或之前停止,晚三叠世初期蒙古-鄂霍茨克洋向南俯冲到华北陆块之下,在阿莫尼亚超大陆的边缘出现岛弧型和弧后的钙碱性岩浆及双峰式岩浆,并出现三叠系与侏罗系的不整合。这个过程引起华北陆块北缘陆内广泛的隆升、岩浆活动和伸展,并伴随着大鄂尔多斯盆地的发展,控制了盆地的形成和演化。

中三叠世纸坊期开始是鄂尔多斯盆地的重要发育期,鼎盛时期为中晚三叠世延长期和早中侏罗世延长期,早白垩世末盆地逐渐消亡,晚白垩世以来为盆地的后期改造时期。在中生代鄂尔多斯盆地的发展演化时期,沉积范围远大于现今盆地,可称为大鄂尔多斯盆地,沉积边界东跨晋、豫、冀、皖,南越现今秦岭北缘,北界和西界远逾现今中生界残留边界^[33~35]。中生代

鄂尔多斯盆地叠加在大型石炭-二叠纪华北克拉通内盆地之上,但上、下盆地之间沉积间断时间较短,没有发生强烈的构造变形或重大地质事件;除盆地边缘局部活动较强地区外,上下盆地的接触关系多为整合——假整合,两盆地间叠合程度高。故将中生代鄂尔多斯盆地的属性厘定为残延克拉通内盆地^[53,54]。中生代以来大鄂尔多斯盆地的演化可以概括为以下过程^[29~35,37,38]:中晚三叠世,全盆沉积,湖域广阔,形成原盆面貌,此时鄂尔多斯盆地的南部和北部分别受控于秦岭-大别山造山带和兴安岭-蒙古造山带,盆内4个沉积旋回特征(图2)^[37]是对这两个造山带构造演化史的响应;早侏罗世,构造变动,沉积间断,剥蚀改造;早中侏罗世富县-延安期,填平补齐,全盆沉积;中侏罗世直罗-安定期沉积与晚期发生改造;晚侏罗世,开始显现区域东隆西拗格局;早白垩世,全盆沉积,分布较广,环境多变;晚白垩世-古新世,整体抬升,沉积间断,区域剥蚀,大鄂尔多斯盆地被破坏,形成第一期夷平面。而后的改造过程包括:始-渐新世,边部解体裂陷,内部东隆西降,

差异沉积-剥蚀,第二期区域夷平面出现;中新世早中期:地堑不整合面发育,随后裂陷扩展,地块整体抬升;第三期区域侵蚀面形成;中新世晚期-上新世,地块隆降反转、东部接受沉积,红土准高原发育;中新世晚期,地块隆降反转,东部接受沉积;上新世,活动强度俱增,红土准高原发育;第四纪,黄土高原形成,黄河水系发育。

2 鄂尔多斯盆地的边界断裂

现存狭义的鄂尔多斯盆地的边界(特别是东界)虽有争议,但是所有边界划分都是根据周边的深大断层确定的^[13,14,40,41,45~49]。如图3所示^[55,56],鄂尔多斯地块及其周缘地区的地震具有强震和危险性,受到防震工作的重视,也是检验和发展活动地块理论的理想场所。

2.1 北部边界

鄂尔多斯盆地的北部边界断层一般认为是包头断裂或与其平行的断层系,向东延至朝阳等地^[14]。滕吉文

图2 鄂尔多斯原型盆地延长组沉积序列的古地理图。SQ1、SQ2、SQ3和SQ4是晚三叠世的沉积旋回^[37]

Figure 2 Paleogeographic map in the depositional sequences of the Yanchang Formation in the greater Ordos Basin. The SQ1, SQ2, SQ3 and SQ4 stand for sedimentary cycles of the Late Triassic^[37]

图3 鄂尔多斯活动地块及周缘活动构造与地震分布图(a), 以及层析成像P波速度在不同深度的剖分结果(b)^[13]

Figure 3 Major active tectonics and regional seismicity in and around the Ordos active block (a) and the segmentation results of P-wave velocity in different depths (b)^[13]

等人^[40,41,45]强调由于受到周边构造的影响,在与鄂尔多斯盆地相邻的北侧和兴蒙造山带之间形成了阴山造山带-河套盆地的山盆耦合过渡区,这个单元也是华北克拉通与兴蒙造山带的界限。阴山造山带是陆内造山带^[40]或者只是一个基底隆起区^[49],还伴有古生代-中生代岩浆岩,在印支期-燕山期经历了多期次挤压和伸展变形作用,形成了本区的逆冲推覆构造体系。河套盆地的地壳密度不同于鄂尔多斯盆地和阴山陆内造山带,其下的基底可埋深7~8 km,莫霍面抬升3~4 km,导致盆地下方的柔性下地壳密度高于两侧^[41]。该带的活动断层在晚第四纪还在活动,是深大的正断层^[13]。地球物理学方法包括重、磁、电以及地震学的研究结果一致,显示在阴山-河套盆地过渡带以及鄂尔多斯盆地的北缘有4条异常带^[45]。它们是在南北方向力的作用下形成的北东向凹陷格局上又叠加了南北向的中央隆起,造成鄂尔多斯盆地的北缘古老基底起伏^[40,41],形成达拉特旗-东胜凹陷、东胜-伊金霍洛凸起、伊金霍洛-刀兔凹陷和榆林以南凹陷^[39]。对于阴山-河套山盆过渡带的边界断裂,除了向东延伸的描述之外,还有研究如马杏垣等人^[57]认为,该断裂从张家口以北处向南东延伸经唐山到山东,并被张伯声和王战^[58]以及马宗晋和王国权^[59]关注。总之,鄂尔多斯北界的断裂是中国境内的重要断裂,它延伸的范围超过了鄂尔多斯盆地的出露范围,其构造意义以及在中新生代对中国构造格局所起的作用,在将来的研究中还会备受关切。

2.2 西部边界

鄂尔多斯盆地西缘边界带是一组南北向断层夹带不同岩石单元的集合地质体^[60-68]。这些地质体主要包括贺兰山背向斜^[62]、银川新生代盆地^[33]、六盘山中生代残留盆地^[68]以及卫宁构造带^[30],东西宽50~200 km,南北长达600 km,面积约60000 km²^[29],其间断续被第四纪甚至现代沉积物覆盖,通常被称为西缘构造带。它总体呈南北向展布,地跨陕、甘、宁、内蒙古四省区,北起内蒙古磴口,经宁夏银川、同心、固原及甘肃平凉,南端达陕西陇县一带。随着库车和酒西晚新生代陆内前陆盆地油气勘探的重大突破,鄂尔多斯盆地西缘又分别被描述为“逆冲推覆构造带”和“前陆盆地”^[62,63]。刘池洋等人^[29]根据勘探资料和测试结果,通过对区域背景、盆山关系、沉积响应、构造特征、原盆面貌、演化过程、发育时限和后期改造等方面的综合研究^[32,60,61]认为,鄂尔多斯盆地西部在中生代整体上不具

前陆盆地属性,它是由中生代华北大克拉通盆地演化而来的。中三叠世-中侏罗世这里的湖盆展布范围广阔,大克拉通盆地沉积范围向西迁移,并逐步收缩,总体是大型残延克拉通内盆地的组成部分,为陆相叠合盆地。南部受到秦岭造山带影响^[61],仅在晚侏罗世以来盆地发育晚期和之后的有限时期和局部地段,存在与前陆盆地结构“貌似”的剖面组合特征。鄂尔多斯西缘构造带因在大地构造上具有独特地位被关注,又被称为南北构造带^[34,64]。它横亘在鄂尔多斯与阿拉善地块、秦岭造山带与祁连造山带等不同特征的构造单元之间,将中国东、西部分隔为现代地质特征明显不同的两大构造域,也是我国东、西部两大地震构造域和地貌区划的分界线。这个带早就被地质学家关注,曾被称为秦岭-内蒙地轴、东亚镜像反映中轴、南北地洼区(过渡)带、中蒙大陆中轴构造带等^[65-67,69-72]。其形成是青藏高原的隆升和西太平洋俯冲以及周边其他块体相互作用的综合结果^[73-76]。

2.3 南部边界

鄂尔多斯盆地的南部边界相对简单,但也有争议,主要观点有两种。一种是华北克拉通的南部边界就是鄂尔多斯盆地的南部边界。这种观点认为^[37],秦岭-大别山造山带由北秦岭地块和南秦岭地块组成。北秦岭地块与鄂尔多斯盆地南缘拼接,其构造演化与盆地的发育关系密切。Dong等人^[72]基于秦岭内蛇绿岩套和俯冲成因辉长岩大量的地质年代学数据统计指出,加里东运动导致北秦岭地块和华北板块碰撞拼合,其间的二郎坪洋俯冲闭合,北秦岭地块和南秦岭地块的拼合则发生在早泥盆世。中三叠世-早侏罗世是南秦岭地块与扬子板块的主要碰撞阶段,此次碰撞促使了秦岭-大别山造山带最终形成。这些资料均表明,秦岭北部从早古生代起就已经存在隆起区,并扮演着鄂尔多斯盆地南部源区的角色,中晚三叠世南秦岭和扬子板块的碰撞缝合线与盆地南部边界有一定的距离。因此,北秦岭地块与华北克拉通的缝合带,就在陕西西安-洛南-栾川-南召沿线。另一种观点根据一些地质资料和地球物理学资料^[13,14,30,33],提出自陕西西安-洛南-栾川-南召断裂以北的地区,出露的基本是前寒武纪岩石,宝鸡-渭南断裂经潼关,或延至韩城-临汾,或经山西永济-河南灵宝,它们以北才是鄂尔多斯盆地。因此,鄂尔多斯盆地的南界应划在宝鸡-渭南断裂,其南侧出露的主要是华北克拉通的前寒武纪基底(图3(a))^[13],以及一些新生代

盆地的沉积岩,后者在地质属性和时代特征上归于晚期的山西地堑系^[33](图4)。

2.4 东部边界

鄂尔多斯的东部边界有多种划法,这与大鄂尔多斯盆地在不同阶段的变化,以及研究者对现今鄂尔多斯盆地的定义和理解有关。从图4可以看到主要的东部边界有3种^[73]。一是鄂尔多斯的东部边界是南北向的离石断裂^[14]。离石断裂是新生代断裂,至今仍在活动^[13,35,39,46],离石断裂的西侧没有前寒武纪基底变质岩石的出露,可以看作是狭义的鄂尔多斯盆地严格意义的边界。第二种东部边界是较宽广的断层系或地堑盆地系,它们由一系列北东走向的断层夹盆地组成(图4),在其南部的临汾-韩城断层可继续南西西向延伸,演变成鄂尔多斯的南部边界断层即宝鸡-渭南断层。该北东-南西向展布的断裂系由北向南,间夹的北东向展布的新生代地堑盆地依次有:大同盆地、忻定盆地、晋中盆地、临汾盆地、运城盆地、渭河盆地(图4)。在这个断裂-盆地带中,存在古老的基底变质岩,它们从西到东或隐或现,隆起区组成吕梁山和太行山,凹陷区是隐伏的基底。此外,还有两个残存的中生代盆地,

即宁静盆地和沁水盆地(图4)^[73],它们的沉积层序以及基本的沉积构造格架与狭义的鄂尔多斯盆地可以对比。因此,将鄂尔多斯的东部边界从离石断裂东移至山西地堑系是完全合理的。第三种观点是鄂尔多斯盆地东部边界再向东移,以太行山前断裂为界。这是因为沁水盆地以及太行山隆起的东部界限是在太行山前断裂,这个断裂是华北中部的重力梯度带的东界,也是渤海湾(华北)盆地的西部边界^[13,46,74]。虽然有新生代构造的影响,但是基底隆起形成吕梁山和太行山,以及中生代残留盆地形成现代的格局,很可能基本轮廓是在晚白垩世开始形成,然后经古近纪至今最后定格。通过构造分析以及热历史演化和裂变径迹方法的研究,太行山和吕梁山初始的隆升记录都是在100 Ma以前,在100~50 Ma相对较慢,从50~40和10 Ma以来隆升速度加快,是主要隆升期。吕梁山和太行山新生代的隆升与华北东部的快速升降相耦合^[30,73,74],换言之,吕梁山、太行山的隆升史与华北克拉通东部和其他主要地区的升降,以及大鄂尔多斯盆地的演化历史和残留盆地的分布显示了共同的规律性^[33],它们是受周边板块相互作用的影响和控制^[75,76]。东部边界的研究无疑具有超过确定边界位置和研究其地质属性的意义。

图4 华北克拉通中西部的盆山分布图以及鄂尔多斯盆地东界示意图^[73]

Figure 4 Sketch map showing the distribution of range-basin in the western-middle NCC and the eastern margins of the Ordos Basin^[73]

3 鄂尔多斯地块(盆地)基底的研究进展

迄今为止,在鄂尔多斯盆地的油气勘查中,钻遇鄂尔多斯地块基底岩系的探井已达二十余口,但获取基底岩芯样品的井仅有十余口,而且这些获取基底岩芯的探井分布不均匀,主要集中在北部基底隆起区和大同-华池断裂一线以南地区.其中,在北部东西向正航磁异常带(伊盟隆起带^[14])钻遇基底并获取岩芯的探井有:胜2、准1、霍3、鄂1、克1、召探1及棋探1井;南部华池大同基底断裂以南的北东向正航磁异常带北部在龙探1、镇钾1、米131和庆深1等探井获得了基底岩石(图5)^[77],二者之间的负磁异常过渡区不仅钻遇基底

探井很少,而且少有探井获得结晶基底岩芯.

在北部伊盟隆起带的钻井中获得的基底钻孔样品的岩性有黑云钾长片麻岩、花岗岩片麻岩、二云钾长片麻岩、二长花岗岩、角闪二长岩、石榴石砂线石片麻岩和二云母片麻岩.通过对胜2井黑云钾长片麻岩进行SHRIMP锆石U-Pb年代学分析^[19],得到两个岩浆锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄分别是 2404 ± 4 和 2544 ± 15 Ma,此外得到一个变质锆石表面年龄为 2278 ± 13 Ma.岩浆核的Hf(*t*)值为 $-8.8 \sim -6.2$,对应的两阶段Hf模式年龄为 $2606 \sim 3221$ Ma^[23].通过对片麻状花岗岩进行了LA-ICP-MS和SIMS锆石U-Pb测年^[24],得到上交点年龄分别为 2496 ± 19 和 2499 ± 41 Ma.而采用LA-ICP-MS对

图5 鄂尔多斯盆地沿周边断裂出露的基底岩石示意图. 据文献[14]并苟龙未发表资料改编

Figure 5 Sketch map showing rough distribution of old basement metamorphic rocks. Modified by Ref. [14] and unpublished information from Gou Longlong

片麻状花岗岩锆石U-Pb测年,得到上交点年龄为 2518 ± 17 Ma. 因此,胜2井的基底钻孔样品是目前已报道所有钻孔样品中最老的. 这些~2.5 Ga花岗岩类岩石的大部分锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在+0.1~+4.1之间,对应的单阶段模式年龄峰值为~2.7 Ga,少量的锆石显示负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,为-3.8~-0.02,其两阶段模式年龄为2.8~3.1 Ga. 鄂1井角闪二长岩的LA-ICP-MS锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2190 ± 56 Ma,霍3井二长花岗岩的上交点年龄为 2035 ± 12 Ma^[23],因此鄂尔多斯基底存在一期约2.2~2.0 Ga岩浆作用事件. 此外,约2.2~2.0 Ga花岗岩类岩石中的~3.40 Ga锆石的两阶段Hf模式年龄为3.1~4.2 Ga. 这些结果表明鄂尔多斯基底有新太古代的地壳存在,并有~2.7 Ga 英云闪长岩系(TTG)片麻岩或更古老陆壳的显示. 之后发育~2.5 Ga花岗岩浆作用,这与华北普遍存在的~2.7 Ga地壳生长以及~2.5 Ga与新生地壳再活化有关的岩浆作用时间相一致. 鄂尔多斯基底2.2~2.0 Ga花岗岩类岩石锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值从正到负有较大的变化范围,与鄂尔多斯盆地东侧的2.2~2.0 Ga花岗岩类岩石相似^[77].

霍3井还获得了石榴矽线石片麻岩样品,其碎屑岩浆锆石的上交点年龄为 2010 ± 23 Ma,而对变质锆石边的NanoSIMS分析获得了上交点年龄 1947 ± 22 Ma, LA-ICP-MS独居石U-Pb分析得到加权平均年龄为 1910 ± 21 Ma^[24]. LA-ICP-MS锆石U-Pb分析得到准1井石榴石黑云母片麻岩中碎屑锆石的上交点年龄为 2046 ± 24 Ma,对变质锆石边的NanoSIMS分析得到加权平均年龄为 1960 ± 23 Ma, LA-ICP-MS独居石U-Pb分析得到两个加权平均年龄为 1936 ± 25 和 1909 ± 13 Ma. 此外,霍3井二云钾长片麻岩中锆石变质边的上交点年龄为 1882 ± 45 Ma^[19]. 胜2井花岗片麻岩中锆石的变质边上交点年龄为 1909 ± 18 Ma,而其独居石的加权平均年龄为 1900 ± 28 Ma^[24]. 召探1井二云母片麻岩中锆石变质边NanoSIMS分析得到上交点年龄为 1915 ± 17 Ma. 因此,除了鄂1井钻孔基底样品外,鄂尔多斯盆地北部钻孔样品均记录了约1.96~1.88 Ga的变质作用.

鄂尔多斯盆地西北部棋探1井的基底钻孔样品为石榴矽线黑云斜长片麻岩^[17,20-23]. SHRIMP锆石U-Pb定年得到碎屑岩浆锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2031 ± 10 Ma^[21],通过NanoSIMS分析得到锆石变质边的上交点年龄为 1964 ± 21 Ma^[24]. 此外对这个样品的电子探针独居石测年得到了两组变质年龄,分别为1.96~1.94和1.90~1.88 Ga^[20]. LA-ICP-MS独居石U-Pb分析获得了1

个上交点年龄和1个加权平均年龄,分别为 1924 ± 15 和 1935 ± 9 Ma^[24]. 这些结果表明鄂尔多斯盆地西北部基底同样经历了1.96~1.88 Ga的变质作用.

鄂尔多斯盆地中南部庆深1井的基底钻孔样品为片麻状花岗岩、长英质片麻岩和花岗片麻岩. 片麻状花岗岩的SIMS锆石U-Pb分析^[23]得到的上交点年龄为 2003 ± 18 Ma,代表其结晶年龄,而对变质锆石边分析得到的上交点年龄为 1844 ± 56 Ma. LA-ICP-MS锆石U-Pb分析获得花岗片麻岩锆石变质边上交点年龄为 1856 ± 21 Ma^[23]. 这些结果表明鄂尔多斯盆地中南部基底经历了~1.85 Ga的变质作用.

鄂尔多斯盆地东部龙探1井的基底钻孔样品为片麻状二云母花岗岩、二云二长片麻岩和二长花岗岩,其中二云母花岗岩的结晶年龄为 2035 ± 10 Ma^[17],二长花岗岩的结晶年龄为 2067 ± 42 Ma^[23]. 二云二长片麻岩中变质锆石边的上交点年龄为 1947 ± 74 Ma,杂砂质片麻岩的变质锆石年龄是 1960 ± 21 Ma^[21]. 此外,通过对二云母花岗片麻岩LA-ICP-MS独居石U-Pb分析,得到 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 1926 ± 16 Ma^[22]. 在龙探1井相邻的镇钾1井基底钻孔获得的样品为二云斜长片麻岩和矽线石片麻岩,得到变质年龄1.83~1.78 Ga^[18]. 这些结果表明鄂尔多斯盆地东部基底经历了1.96~1.80 Ga的变质作用.

综上,已有研究结果表明,鄂尔多斯地块(盆地)基底有新太古代花岗片麻岩和古元古代沉积岩和花岗岩,并广泛记录了古元古代的变质事件. 其中,新太古代岩石的记录尚有限,特别是在南部的样品获取困难,需要继续关注. 在不同位置基底钻孔样品均获得了古元古代1.96~1.80 Ga的变质年龄,2.2~2.0 Ga的花岗岩浆作用也很普遍^[77]. 鄂尔多斯的基底与其北界和东界外的阴山(北部)陆块和华北克拉通中部带古老变质岩石高度相似^[77].

4 鄂尔多斯盆地周边基底的概况

狭义的鄂尔多斯盆地周边的断裂外沿,都有变质的古老基底出露(图5). 由于后期特别是晚白垩世-新生代构造的破坏以及现代构造的改变和堆积物的掩埋,没有很清楚的出露. 以往的研究主要集中在北部边界北沿的阴山带包括大青山、乌拉山变质岩系,南部边界南沿的蓝田-华阴、永济-绛县、灵宝-济源一线的古老变质岩系,以及东部边界的中条山、吕梁山,向北到阜平-五台山一线的古老变质岩系. 值得指出的是,东侧

在吕梁山-中条山出露区再向西,紧靠或邻近离石断裂,也还分布着一些古老基底的露头,如运城-稷山-交口-离石-岚县一线,有在地表发现断续的古老基底岩石,或者在新修公路或铁路的隧道中打到了被覆盖的基底岩石.西侧的研究比较粗略,除贺兰山被认为是西界边沿(或者划到西北界边沿)之外,银川盆地的基底以及陇县-宝鸡一带,也有古老基底岩石被报道.

4.1 北界边沿基底岩石

北部边沿广泛出露的基底变质岩,被认为是阴山(北部)地块或者阴山陆内造山带的基底,区域分布南从包头断裂向北可延到白云鄂博地区.白云鄂博地区古元古代-新元古代基底岩石出露区主要记录持续的裂解作用,如中元古代渣尔泰-白云鄂博-化德裂谷系^[78,79].除了大量的裂谷沉积岩系外,少量的变质基底岩石也在白云鄂博地区被发现^[80].阴山地块(造山带)内大致可以划分出南部的古元古代孔兹岩带、中部的阴山地块新太古代-古元古代基底岩石区及北部白云鄂博古元古代-新元古代岩石区.白云鄂博岩石区除发现了2.5 Ga的中酸性侵入岩外,还发现2.0 Ga的闪长质和花岗质侵入岩,以及1.9 Ga的石榴石-蓝晶石片麻岩;白云鄂博群中浅变质石英砂岩中的碎屑锆石也记录有2.6~2.5、2.0、1.9 Ga三组峰值.

古元古代变质沉积岩带也称为孔兹岩带,是北部地区最具代表性的岩石组合.一些研究认为该带西段在磴口附近南向西延伸延至贺兰山地区,也有研究认为它是继续向西,延到千里山变质岩带,进而可能延到阿拉善地区^[81,82].孔兹岩东段的延伸状态也有不同认识,是继续由兴和东延到冀北-辽西,还是在内蒙古黄土窑-山西大同一带被中部高压基性麻粒岩带截断并交汇,仍存在分歧^[83-85].有研究认为不仅上述讨论所讲的不同地区变质泥质岩石是相同的组合,在溁沱群、吕梁群、中条群,以及华北其他地区如山东和辽吉地区,变质的角闪岩相-麻粒岩相的古元古代沉积岩石组合都是相当的地层单元.它们特征地含有变质的黑色页岩,成为石墨重要的原岩^[36,86,87].孔兹岩带主要由富铝的变质沉积岩-大理岩(孔兹岩系)、同构造紫苏花岗岩或S-型花岗岩以及太古宙TTG片麻岩夹铁镁质麻粒岩透镜体组成,孔兹岩系原岩为碎屑岩-泥质岩-碳酸岩-蒸发岩组合的稳定沉积,变质组合和变质反应的研究确定它们经历了叠加超高温变质作用,总体具有顺时针的*P-T*轨迹^[88-99].假蓝宝石是Mg-Al质麻粒岩

中一种特殊的高温矿物,它的出现可能与幔源基性岩浆底侵、甚至有规模的部分熔融或长期的热造山作用相关,对于深化超高温变质作用的研究有重要意义^[97,100].乌拉山-大青山孔兹岩系岩石均存在大量继承性碎屑锆石和变质增生锆石,U-Pb定年数据有较多的积累.继承性碎屑锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄主要集中在2400~2500、~2300和2000~2100 Ma,限定其沉积时代约为2000 Ma.变质锆石记录其时代为1850~1950 Ma,分为1950和~1860 Ma两组年龄峰值^[101].综合孔兹岩带乌拉山-大青山地区高级变质地体的变质作用、构造演化和同位素年代学的研究结果,已发表的文章建立了不同的构造模式,赋予孔兹岩带重要的大地构造意义^[90,102,103].

4.2 西界边沿基底岩石

西部边沿的基底岩石出露很零星,一直没有人进行系统的研究.其中在西缘构造带北段的贺兰山背斜,其基底变质岩称为贺兰山群,由于它们与北缘的大青山-乌拉山变质沉积岩带的特征十分相似,一些研究将它们划归北缘的古元古代变质带或称为西部孔兹岩带^[104].从岩石露头的分布来看,它们在最北段是北东向展布,然后向南渐变为北北东向展布,并被银川盆地沉积岩覆盖.有研究认为,银川盆地之下有贺兰山群的岩石作为基底(西北大学前寒武纪地质中心,口头交流).贺兰山岩群主要由富铝片麻岩、黑云片麻岩、中-基性麻粒岩、大理岩和钙硅酸盐岩等变质岩组成,其中富铝片麻岩和黑云片麻岩是主体,约占变质地层的90%以上^[105,106].贺兰山群经历了角闪岩-麻粒岩相变质作用,它们与相近时代的花岗岩类密切共生,二者显示渐变关系或构造接触.在对贺兰山富铝岩系研究过程中,发现了具有“蓝晶石+条纹长石+石榴石”特征组合的高压泥质麻粒岩^[107],曾经历4个阶段的变质演化过程,P-T轨迹具有顺时针演化样式,峰期后表现为先发生近等温降压(ITD)、后发生近等压冷却(IBC)的退变过程.碎屑锆石年龄集中在2010~2020 Ma之间,它们的Hf模式年龄在2.3~2.5 Ga.这些碎屑锆石多具有岩浆结构特征,反映当时曾存在过大规模和多期花岗质岩浆活动.另有少量大于2520~2949 Ma的锆石,显示了太古宙的基底岩石记录.变质锆石数据说明孔兹岩带发生过两期变质作用,早期变质作用发生在约1.96~1.95 Ga,晚期变质作用发生在约1.87 Ga^[108,109].贺兰山北部的片麻状含石榴黑云母花岗岩和似斑状石榴黑云母花

岗岩侵位年龄分别为~2.0和~1.97 Ga, 属于古元古代时期不同阶段岩浆作用的产物^[107]。对元古宙花岗岩的研究还存在成因与阶段划分的争论, 但是对贺兰山的沉积变质岩带的研究几乎没有异议地认为与北缘的孔兹岩带属于同一岩石构造单元。

出露于西缘构造带南段的变质杂岩称为岷山群, 有一些古生代或中生代的岩浆和变质年龄。最近有研究在其中识别出新太古代和古元古代的岩浆和变质年龄(西北大学前寒武纪地质中心, 口头交流)。另有报道在陕西省陇县西铁马河西北地区, 发现辉绿-辉长岩墙或岩块零星出露并整体带状分布^[78], 它们具有富集地幔源的地球化学特征。LA-ICP-MS锆石上交点年龄为 2018 ± 16 Ma, 具有低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7003~0.7064)和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+5.14~+4.33), Nd同位素一阶段模式年龄约2.0 Ga。结合区域地质资料的研究推测, 华北克拉通西部地块在2.0 Ga期间的伸展背景与东部陆块一致, 暗示整个华北克拉通在古元古代成山纪的挤压事件之前存在广泛的裂解事件。

4.3 南界边沿基底岩石

鄂尔多斯地块南界宝鸡-渭南断裂以南至秦岭造山带北界之间, 断续出露早前寒武纪基底岩石, 其规模和范围都比以前想象的大。前寒武纪变质基底岩石的出露大致近东西向展布。在潼关附近, 或北东东方向延入灵宝至济源一带; 或近北东方向延至永济-运城, 在夏县和绛县附近较多出露, 与吕梁山-中条山区(即东界边沿)的变质岩连成一气。

陕西境内的前寒武纪基底岩石露头主要分布于蓝田-临潼-华县-华阴-潼关一带, 包括临近的河南灵宝阳平镇, 陕西地质志统称其为小秦岭地区^[110], 在构造区划上属于太华杂岩西段岩系^[111]。小秦岭太华杂岩经历了前寒武纪多期次岩浆-变质作用并遭受多期构造叠加变形, 其主体由新太古代变质结晶基底岩石(又称下太华岩群)及南北边缘出露的古元古代变质表壳岩(又称上太华岩群)组成, 后期被中生代-新生代花岗岩侵入。下太华岩群主要由黑云母长英片麻岩、混合岩、细粒片麻岩(变粒岩)及斜长角闪岩构成, 在蓝田、华县、华阴等地区出露较多。长英质片麻岩原岩为TTG质及花岗质深成侵入体, 形成时代大致可以分为三期, 即约2800~2780 Ma(TTG片麻岩)、2550~2470 Ma(花岗片麻岩)、2350~2200 Ma(混合片麻岩), 此外还有约1850~1800 Ma的花岗岩, 以及2330~2300 Ma的斜长角

闪岩^[112~117]。这些岩石普遍含有约1.96~1.85 Ga变质锆石^[114,117]。上太华岩群变质表壳岩主要由黑云母斜长片麻岩、斜长角闪岩、长石石英岩、含磁铁矿石英岩、大理岩等组成, 原岩为陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩, 并夹有中基性火山岩。部分斜长角闪岩有石榴石白眼圈结构, 偶含紫苏辉石, 说明这类岩石经历了压力相对高的角闪岩相和麻粒岩相变质。锆石年代学研究限定了它们的沉积时限在约2.2~2.1 Ga, 并记录了约1.97~1.83 Ga古元古代变质事件^[112,115]。

灵宝境内的下太华岩群部分被中元古界熊耳群放牛山石英岩覆盖, 以2.52~2.50 Ga奥长花岗片麻岩为主(出露面积80%以上), 其次为富钾花岗片麻岩以及石英闪长片麻岩^[118,119], 少量花岗闪长岩和石英闪长岩侵位年龄为2.32~2.31 Ga。区内广泛分布2.10~2.07 Ga浅变质辉长-辉绿岩墙或岩脉。济源境内的新太古代岩石称为林山岩群, 古-中元古界的沉积表壳岩系是银鱼沟群、铁山河群和双房群, 以及覆于其上的中元古界西阳河群^[120]。林山岩群可以进一步划分为2.53 Ga变火山岩(斜长角闪岩)、2.52 Ga闪长质片麻岩、2.57~2.55 Ga TTG片麻岩和2.53~2.52 Ga钾质花岗岩^[121]。位于济源之南的嵩山地区由新太古界登封岩群、古元古代嵩山群和侵入岩体构成。TTG片麻岩有2.62~2.53 Ga的锆石年龄, 它们又被2.51 Ga许台花岗岩侵入。斜长角闪岩有两期, 年龄分别是2.54~2.51和2.30 Ga, 此外~2.3 Ga的古元古代伟晶岩广泛发育^[122~125]。

分布于永济-解州-夏县-绛县一带的前寒武纪基底岩石在山西地质志中称为涑水杂岩, 它们与中条山、太岳山地区的基底岩石相连^[126,127]。长英质片麻岩主要为TTG组分, 形成时代为2.70~2.72和2.56~2.45 Ga, 第一期TTG片麻岩的Hf同位素组成表明其来自2.7 Ga的新生地壳物质^[128], 第二期岩浆来源于新太古代晚期下地壳的部分熔融, 也有更古老地壳物质的贡献。变花岗岩类分布于冷口-烟庄-横岭关一带, 侵入到TTG片麻岩中, 形成时代约为2.44~2.48 Ga^[129,130], 经历了约1.85~1.88 Ga的变质作用^[131]。

4.4 东界边沿基底岩石

鄂尔多斯盆地东界边沿的基底岩石出露面积很大。如前所述, 在离石断裂的东沿就有零星分布, 如从离石向北至岚县, 或从离石向南经中阳、交口、稷山、稷王山至运城都有岩石露头, 对这些岩石的研究程度很低。上述露头区虽然断续南北成带, 但是很可能与东面

吕梁山隆起以及更东面的太行山隆起是相通的,目前的不连续是晚白垩世以来的基底隆升和凹陷造成的。

中条山地区的基底岩石分布在鄂尔多斯基底的南界东段和东界南段的交汇处。绛县的基底片麻岩特征与运城-夏县的相同。在绛县以北出露的太岳杂岩,其中新太古代的片麻岩在克拉通化之后经历了很强的混合岩化改造以及高角闪岩相-麻粒岩相变质。2.3 Ga含石榴子石花岗岩片麻岩和2.18 Ga含或不含黑云母的斜长片麻岩(黄梁花岗质片麻岩)是早期片麻岩(正南沟片麻岩)部分熔融的产物,它们共同被后期未变形的二长-钾长花岗岩和中元古代基性岩墙侵入(祝禧艳等人,待发表工作)。中条山区有多层早前寒武纪表壳岩,主要有绛县群和中条群,以及不整合与其上的担山石群。对绛县群尚存它们是新太古代和古元古代的争论,一般认为其形成时代老于中条群。中条群经历了绿片岩-角闪岩相变质作用,是主要的含铜层位^[132]。吕梁杂岩主要由古元古代变质表壳岩和大量多次的古元古代侵入岩组成。吕梁地区的表壳岩系可分为界河口群、吕梁群、野鸡山群、岚河群和黑茶山群,碎屑锆石中岩浆年龄分布集中于2.4~2.5、2.0~2.3和1.93~1.94 Ga三组^[133~138];泥质麻粒岩的变质锆石年龄分布于1.84~1.96 Ga^[139~141],变质峰期条件为6.0~9.0 kbar/695~840°C^[140,141]。

从吕梁山地区更向东或东北方向,早前寒武纪基底岩石出露范围就与太行山地区的基底交汇。五台山与其北侧的恒山及其南侧的阜平,是华北的古元古代“中部造山带”或“晋豫活动带”的岩石分布区和命名地。恒山地区与阜平地区都是新太古代高级片麻岩区,恒山地区总体变质程度是麻粒岩相,阜平地区总体变质程度是角闪岩相,两个地区都有高压麻粒岩相或高压角闪岩相的岩石出露^[142~147]。五台早前寒武纪岩石被认为是新太古代绿岩带,除了新太古代的含条带状磁铁矿(BIF)的五台表壳岩系外,还有古元古代的溥沱群表壳岩系,后者一般认为是可以与吕梁群和中条群对比的^[4,5]。在五台山的朱家坊表壳岩中,也报道有高压麻粒岩岩相的岩石^[145~147]。阜平继续往南进入太行山腹地以及太行山南段,那里分布的赞皇杂岩,也解体为新太古代的片麻岩和古元古代的表壳岩系。赞皇高压麻粒岩相变质的岩石以及其他的岩石组合,被有些研究推测可以向北延伸到五台山,再北东向或北东东向延入冀东和辽西,并认为上述所有的新太古代和古元古代杂岩都是可以互相对比的岩石构造单元^[148]。

5 讨论与建议

5.1 基本认识

鄂尔多斯地块的研究进展可以简单归纳成以下几点。

(1) 鄂尔多斯盆地是中元古代以来长期发展和演化的克拉通内盆地,它的基底是太古宙杂岩以及古元古代变质岩系。

(2) 盆地最早的沉积地层是长城系和蓟县系,基本缺失青白口系和南华系,偶见震旦(埃迪卡拉)系;普遍有寒武系-中奥陶系以及中石炭统-三叠系的沉积,缺失中奥陶统-下石炭统地层,古生代的沉积序列与华北的典型特征一致。

(3) 晚三叠世以来受到南北造山带的影响,是鄂尔多斯盆地的重要演化期,这时盆地的东部可以延伸到渤海湾-徐淮带,称为大鄂尔多斯盆地。这个盆地在后期受到周边块体的影响,变化很大。盆地的前寒武纪变质基底出露在吕梁山和太行山两个隆起区,抬升的时代大致是在晚白垩世至今,同时还发育一系列新生代地堑式盆地,大致雁行式分布在狭义鄂尔多斯盆地的东侧(山西地堑系)。

(4) 狭义的鄂尔多斯盆地的周缘边界都是新生代的深大活动断裂。

(5) 近年来,油气勘探的一些钻井采到前寒武纪变质基底的岩石样品,确定有新太古代(~2.5 Ga)的花岗片麻岩,以及古元古代的泥质片麻岩和花岗岩。它们的地球化学和变质作用特征被认为与华北克拉通北部和中部的古元古代变质岩系和相关的壳熔花岗岩高度相似。

(6) 狭义的鄂尔多斯盆地边界断裂的周边变质基底的研究也有不少进展,不仅认为在南、北和东界的基底岩石可以对比之外,有研究提出西界边沿的基底岩石也具有相似性。

5.2 研究的突破口和存在的问题

鄂尔多斯地块(盆地)是华北克拉通的核心地质构造单元,是建立华北古大陆形成、构造演化构架以及讨论构造体制演变的重要依据。上述进展提供了新的思考,也是突破原有思维定式、有望推陈出新的机遇。至少有以下几个问题需要继续深化研究,综合对比,去伪存真。

(1) 狭义鄂尔多斯盆地内部基底的深入研究,它是

否具有华北克拉通的基底与盖层特征?要进一步解读地球物理学资料,加强对盆地内部基底的结构和物质组成的认识,还要深化现已得到的以及将来可能会继续获取的石油钻机岩芯的研究,回答盆地内部是否具有统一的基底,以及在后来的构造事件中如何被改造。

(2) 鄂尔多斯盆地内部与其周边的变质基底岩石的对比研究。这个问题将要回答被掩盖在深部的鄂尔多斯盆地基底与其周缘的出露地表或未出露地表的变质基底岩石是否属于同一岩石构造单元,也就是说鄂尔多斯的基底与其四周断裂边界外地质单元的基底是否相同?

(3) 前两个问题的研究,必将导出和需要回答第3个问题:鄂尔多斯地块是代表西部陆块的独立地块吗?如果鄂尔多斯盆地内部基底与周边基底相同,那么就有可能证实以鄂尔多斯地块为代表的独立的西部陆块是不存在的,其北部的阴山地块和其东部的华北中部造山带都是隆起的鄂尔多斯盆地基底。如果鄂尔多斯盆地的内部基底与其北部和东部不同,则它有可能是一个独立的古老陆块,需要进一步建立它的演化构造格架。

(4) 鄂尔多斯地块是如何形成和演化的?这个问题不只是涉及古老的原型克拉通盆地的演化,还涉及华北古陆的基底是如何在长期复杂的地质过程中被改造的。现存的鄂尔多斯地块的基底与显生宙盖层的出露格局是多期构造活动的结果,已有的对吕梁山和太行山的研究显示,这两个地区前寒武纪基底岩石隆升成山主要发生在晚白垩世和始新世以来。

(5) 鄂尔多斯周缘变质基底的隆升历史以及华北克拉通全区变质基底隆升的对比研究。上面第4个问题即对鄂尔多斯地块的形成演化历史的研究,是第5个问题的研究基础。华北克拉通的北、南缘以及东缘的古老基底出露区,很可能与吕梁山和太行山有相似的抬升史,也就是说华北克拉通的全区前寒武纪基底岩石隆升成山和隆凹格局可能也是主要发生在晚白垩世和始新世以来。这将对是否存在东部陆块、西部陆块、中央造山带以及北部陆块等基本的前寒武纪地质单元

划分引发新的思考和重构。

(6) 进一步确立狭义鄂尔多斯盆地基底边界及其性质,解剖北界和南界可能是一个较好的选择,研究将深刻刻画鄂尔多斯盆地的演变历史,以及作为华北克拉通关键地质单元的鄂尔多斯地块的构造属性、演变过程、与邻近地质单元的地质联系以及动力学标志。

(7) 鄂尔多斯地块内外古元古代变质沉积岩系(孔兹岩系)的分布特征及其大地构造意义。这个问题不仅关系到华北克拉通的早期演化,还关系到高压-高温/超高温高级麻粒岩相(HP-HT/UHT)变质作用的动力学以及古元古代造山(活动)带构造体制。现在很多研究将孔兹岩系视为大陆碰撞带的代表性岩石组合,将HP-HT/UHT麻粒岩相变质作用视为大陆碰撞型变质作用。如果狭义鄂尔多斯盆地古元古代基底与四周的孔兹岩系的岩石组合-变质作用-构造演化等特征诸方面可以对比,并继续与东部的冀东-冀北-胶东-辽吉-朝鲜半岛-日本Hida-Okai带、以及华北南缘的陕-豫-皖一带的相似岩石组合可以对比,那么华北HP-HT/UHT麻粒岩带将是异常宽大的,对于它的分布和展布、变质特征、地质含义、构造机制和动力学都会提出新的思考。此前的研究中,就有认为华北广泛存在的含泥质岩石的沉积岩组合(孔兹岩系)是华北克拉通的新太古代末-早元古代初的沉积盖层、是克拉通化标志的意见^[7,36]。鄂尔多斯地块基底与华北克拉通古元古代变质岩的区域比较和精细研究是重要的研究课题,也是破解华北早期大陆形成和构造体制演化谜团的关键选项。

上述科学问题的深化研究可能触及某些重大科学问题,例如早期陆核和微陆块、陆壳多期生长和克拉通化的内涵理解;又如古元古代成山纪造山作用与奴那(哥伦比亚)超大陆的形成、早期板块构造启动的时间和机制等,新的研究可能会提出不同的认识或争鸣。此外,鄂尔多斯北界“阴山造山带”和东界“太行山造山带”,还被一些研究者认为是陆内造山带的典型实例^[7,148],新研究对于如何完善或修订陆内造山带的定义和概念也具有积极意义。

致谢

在本文的构思过程中,曾在中国科学院地质与地球物理研究所的前寒武纪地质学科组以及西北大学前寒武纪地质研究中心进行过学术交流,对所有同行、同事和学生们表示衷心感谢。特别感谢西北大学的苟龙龙、赵燕博士,中国地质科学院矿产资源研究所的马旭东博士,中国科学院地质与地球物理研究所的周艳艳、祝禧艳、周李岗、刘博博士,以及中国科学院新疆生态与地理研究所的贾晓亮博士在百忙中帮助收集资料和归纳研究进展,并提出有益的见解和建议。感谢审稿人建设性和专业性的建议。

参考文献

- Zhai M G. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1110–1120 [翟明国. 华北古陆与克拉通化. 中国科学: 地球科学, 2011, 54: 1110–1120]
- Zhai M G. Multi-stage crustal growth and cratonization of the North China Craton. *Geosci Front*, 2014, 5: 457–469
- Zhao G, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2000, 103: 55–88
- Zhai M G, Peng P. Paleoproterozoic tectonic event in the North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2007, 23: 2665–2682 [翟明国, 彭澎. 华北克拉通元古代构造事件. 岩石学报, 2007, 23: 2665–2682]
- Zhai M G. 2.1–1.7 Ga geological events in the North China Craton and its geotectonic significance (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2004, 20: 1343–1354 [翟明国. 华北克拉通2.1–1.7 Ga地质事件群的分解和构造意义探讨. 岩石学报, 2004, 20: 1343–1354]
- Li J L, Wang K Y, Wang Q C, et al. Early Proterozoic collision orogenic belt in Wutaishan area, China (in Chinese). *Chin J Geol*, 1990, 25: 1–11 [李继亮, 王凯怡, 王清晨, 等. 五台山早元古代碰撞造山带初步认识. 地质科学, 1990, 25: 1–11]
- Bai J, Huang X G, Dai F Y, et al. The Precambrian Evolution of China (in Chinese). 2nd Ed. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 36–38 [白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 等. 中国前寒武纪地壳演化. 第二版. 北京: 地质出版社, 1993. 36–38]
- Qian X L. Nature of the early continental crust and its tectonic evolution (in Chinese). In: Qian X L, Wang R M, eds. *Geological Evolution of the Granulite Terrain in North Part of the North China Craton*. Beijing: Seismological Press, 1994. 1–6 [钱祥麟. 早期大陆地壳研究的意义和问题. 见: 钱祥麟, 王仁民, 编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994. 1–6]
- Shen Q H, Xu H F, Zhang Z Q, et al. Precambrian Granulites in China (in Chinese). Beijing: Geological Publish House, 1992 [沈其韩, 徐慧芬, 张宗清, 等. 中国前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992]
- Guo J H, Zhai M G, Zhang Y G, et al. Early Precambrian Manjinggou high-pressure granulite mélange belt: Their geological characteristics, petrology and isotopic geochronology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1993, 9: 1–13 [郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学. 岩石学报, 1993, 9: 1–13]
- Kusky T M, Li J H, Glass A, et al. Origin and emplacement of Archean ophiolites of the Central Orogenic belt, North China Craton. *Dev Precambrian Geol*, 2004, 13: 223–274
- Santosh M, Wilde S, Li J H. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. *Precambrian Res*, 2007, 159: 78–196
- Zheng W J, Wang Q L, Chen J H, et al. Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block (in Chinese). *Prog Earthq Sci*, 2020, 50: 1–21 [郑文俊, 王庆良, 陈九辉, 等. 鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展. 地震科学进展, 2020, 50: 1–21]
- Li B, Song Y B, Shi L, et al. Characteristics of gravity and magnetic fields in Ordos Basin and their geological significance (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2019, 43: 767–777 [李冰, 宋燕兵, 石磊, 等. 鄂尔多斯盆地的磁场特征及地质意义. 物探与化探, 2019, 43: 767–777]
- Zhu R X, Zheng T Y. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 1950–1961 [朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54: 1950–1961]
- Wan B, Yang X, Tian X, et al. Seismological evidence for the earliest global subduction network at 2 Ga ago. *Sci Adv*, 2020, 6: eabc5491
- Hu J M, Liu X S, Li Z H, et al. SHRIMP U-Pb dating for basement metamorphic rocks and granites in Ordos Basin (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2482–2491 [胡健民, 刘新社, 李振宏, 等. 鄂尔多斯盆地基底变质岩与花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年. 科学通报, 2012, 57: 2482–2491]
- Wu S J, Zhang Y S, Xing E Y. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons of Ordos basin metamorphic basement and its geological significance (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2015, 89: 2171–2186 [吴素娟, 张永生, 邢恩袁. 鄂尔多斯盆地变质基底中碎屑锆石的LA-ICP-MS U-Pb年龄及其构造意义. 地质学报, 2015, 89: 2171–2186]
- Wan Y, Xie H, Yang H, et al. Is the Ordos Block Archean or Paleoproterozoic in age? Implications for the Precambrian evolution of the North China Craton. *Am J Sci*, 2013, 313: 683–711
- Gou L L, Zhang C L, Brown M, et al. *P-T-t* evolution of pelitic gneiss from the basement underlying the Northwestern Ordos Basin, North China Craton, and the tectonic implications. *Precambrian Res*, 2016, 276: 67–84
- Wang W R, Liu X, Hu J, et al. Late Paleoproterozoic medium-P high grade metamorphism of basement rocks beneath the northern margin of the Ordos Basin, NW China: Petrology, phase equilibrium modelling and U-Pb geochronology. *Precambrian Res*, 2014, 251: 181–196
- He X F, Santosh M, Bockmann K, et al. Petrology, phase equilibria and monazite geochronology of granulite-facies metapelites from deep drill cores in the Ordos Block of the North China Craton. *Lithos*, 2016, 262: 44–57
- Zhang C, Diwu C, Kröner A, et al. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution of the Ordos Block in the North China Craton: Constraints from

- zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes for gneissic granitoids of the basement. *Precambrian Res*, 2015, 267: 121–136
- 24 Wang W R, Zhao Y, Liu X, et al. Metamorphism of diverse basement gneisses of the Ordos Basin: Record of multistage Paleoproterozoic orogenesis and constraints on the evolution of the western North China Craton. *Precambrian Res*, 2019, 328: 48–63
 - 25 Yu J H, Wang C Y, Lai M Y, et al. Re-division of the metamorphic facies zonation of Lüliang group in Shanxi Province and its significance (in Chinese). *Geol J Chin Univ*, 1999, 5: 66–75 [于津海, 王赐银, 赖鸣远, 等. 山西古元古代吕梁群变质带的重新划分及地质意义. *高校地质学报*, 1999, 5: 66–75]
 - 26 Geng Y S, Wan Y S, Yang C H. The Palaeoproterozoic rift-type volcanism in Lüliangshan area, Shanxi Province, and its geological significance (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2003, 24: 97–104 [耿元生, 万渝生, 杨崇辉. 吕梁地区古元古代的裂陷型火山作用及其地质意义. *地球学报*, 2003, 24: 97–104]
 - 27 Sun D Z, Li H M, Lin Y X, et al. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao mountains (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 1991, (3): 216–231 [孙大中, 李惠民, 林源贤, 等. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. *地质学报*, 1991, (3): 216–231]
 - 28 Xu H, Luo J H, Ren Z L, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of Paleoproterozoic diabase at the southwestern margin of the Ordos Block (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 1186–1198 [徐欢, 罗金海, 任战利, 等. 鄂尔多斯地块西南缘古元古代辉绿岩年代学、地球化学及构造意义. *岩石学报*, 2020, 36: 1186–1198]
 - 29 Liu C Y, Zhao H G, Wang F, et al. Attributes of the Mesozoic structure on the west Margin of the Ordos Basin (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2005, 79: 737–747 [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. *地质学报*, 2005, 79: 737–747]
 - 30 Liu C Y, Zhao H G, Gui X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2006, 805: 618–638 [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. *地质学报*, 2006, 805: 618–638]
 - 31 Liu C Y, Wang J Q, Qiu Q W, et al. Geodynamic environment and tectonic attributes of the hydrocarbon—Rich sag in Yanchang Period of Middle—Late Triassic, Ordos Basin (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 1913–1930 [刘池洋, 王建强, 邱欣卫, 等. 鄂尔多斯盆地延长期富烃坳陷形成的动力学环境与构造属性. *岩石学报*, 2020, 36: 1913–1930]
 - 32 Chen Y F, Chen J H, Guo B, et al. Crustal structure and deformation between different blocks in the northern part of the western margin of Ordos (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2020, 63: 886–896 [陈一方, 陈九辉, 郭飏, 等. 鄂尔多斯西缘北段的地壳结构和块体间变形关系. *地球物理学报*, 2020, 63: 886–896]
 - 33 Zhao J F, Liu C Y, Yu L, et al. The transfer of depocenters and accumulation centers of Ordos Basin in Mesozoic and its meaning (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2008, 4: 540–552 [赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 等. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义. *地质学报*, 2008, 4: 540–552]
 - 34 Zhao X C, Liu C Y, Wang J Q, et al. Mesozoic geological events and its evolution sequence of the northern north-south tectonic belt, China (in Chinese). *Geol Rev*, 2018, 64: 1324–1338 [赵晓辰, 刘池洋, 王建强, 等. 中国南北构造带北部中生代地质事件及其演化序列. *地质论评*, 2018, 64: 1324–1338]
 - 35 Yang M H, Liu C Y, Zeng P, et al. Prototypes of late Triassic sedimentary basins of North China Craton (NCC) and deformation pattern of its early destruction (in Chinese). *Geol Rev*, 2012, 58: 1–18 [杨明慧, 刘池洋, 曾鹏, 等. 华北克拉通晚三叠世沉积盆地原型与破坏早期构造变形格局. *地质论评*, 2012, 58: 1–18]
 - 36 Li J H, Qian X L, Liu S W. Geochemical characteristics of khondalite series in the central North China Craton and its significance for continental cratonization (in Chinese). *Sci China Ser D Earth Sci*, 1999, 29: 193–203 [李江海, 钱祥麟, 刘树文. 华北克拉通中部孔兹岩系的地球化学特征及其大陆克拉通化意义. *中国科学D辑: 地球科学*, 1999, 29: 193–203]
 - 37 Ruan Z, Luo Z, Yu B S, et al. Middle-Late Triassic basin prototype and tectonic paleographic response in the Ordos Basin (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2021, 28: 12–32 [阮壮, 罗忠, 于炳松, 等. 鄂尔多斯盆地中-晚三叠世盆地原型及构造古地理响应. *地学前缘*, 2021, 28: 12–32]
 - 38 Wu H T, Sun M X. Shallow description of tectonic evolution of the Ordos Basin (in Chinese). *Sci Technol Inf*, 2019, 7: 78–81 [武洪涛, 孙妹娟. 鄂尔多斯盆地构造演化浅述. *科技咨询*, 2019, 7: 78–81]
 - 39 Li M, Yan L, Han C Y. Structural characteristics of Ordos Basin basement (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci)*, 2012, 42(Suppl3): 38–43 [李明, 闫磊, 韩昭阳. 鄂尔多斯盆地基底构造特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(Suppl3): 38–43]
 - 40 Teng J W, Wang F Y, Zhao W Z, et al. Velocity structure of layered block and deep dynamic process in the lithosphere beneath the Yinshan orogenic belt and Ordos Basin (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2010, 53: 67–85 [滕吉文, 王夫运, 赵文智, 等. 阴山造山带——鄂尔多斯盆地岩石圈层、块速度结构与深层动力过程. *地球物理学报*, 2010, 53: 67–85]
 - 41 Ren Z L, Qi K, Liu R C, 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 (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 1213–1234 [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. *岩石学报*, 2020, 36: 1213–1234]
 - 42 Bao H P, Shao D B, Hao S L, et al. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin (in Chinese). *Earth Sci Front*,

- 2019, 26: 33–43 [包洪平, 邵东波, 郝松立, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化. 地学前缘, 2019, 26: 33–43]
- 43 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. *Earth Planet Sci Lett*, 2020, 547: 116451
- 44 Meng Q R, Wu G L, Fan L G, et al. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China block. *Earth-Sci Rev*, 2019, 190: 416–438
- 45 Ruan X M, Teng J W, An Y L, et al. Analysis of magnetic anomaly and crystalline basement of the Yinshan orogen and the northern Ordos Basin regions (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2011, 54: 2272–2282 [阮小敏, 滕吉文, 安玉林, 等. 阴山造山带和鄂尔多斯盆地北部磁异常场与结晶基底特征研究. 地球物理学报, 2011, 54: 2272–2282]
- 46 Wang S J, Wang F Y, Zhang J S, et al. The P-wave velocity structure of the lithosphere of the North China Craton—Results from the Wendeng-Alxa Left Banner deep seismic sounding profile. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 2053–2063 [王帅军, 王夫运, 张建狮, 等. 华北克拉通: 石圈二维P波速度结构特征——文登-阿拉善左旗深地震测深剖面结果. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 2697–2708]
- 47 Xu L B, Wei W B, Jin S, et al. Study of deep electrical structure along a profile from northern Ordos block to Yinshan orogenic belt (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 575–584 [许林斌, 魏文博, 金胜, 等. 鄂尔多斯地块北部至阴山造山带深部电性结构特征研究. 地球物理学报, 2017, 60: 575–584]
- 48 Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. Upper mantle anisotropy beneath the northern segment of the north-south tectonic belt in China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2016, 59: 4035–4047 [常利军, 丁志峰, 王椿镛. 南北构造带北段上地幔各向异性特征. 地球物理学报, 2016, 59: 4035–4047]
- 49 Zhang Y Q, Teng J W, Wang F Y, et al. Structure of the seismic wave property and lithology deduction of the upper crust beneath the Yinshan orogenic belt and the northern Ordos block (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2011, 54: 87–97 [张永谦, 滕吉文, 王夫运, 等. 阴山造山带及鄂尔多斯盆地北部地区上地壳的地震波属性结构及岩性推断. 地球物理学进展, 2011, 54: 87–97]
- 50 Yang Z S. *Methods of Geological Survey and Comprehensive Study of High Grade Metamorphic Areas* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2008 [杨振升. 高级变质区地质调查与综合研究方法. 北京: 地质出版社, 2008]
- 51 Wang J, Lu S N, Li H M, et al. *Journal of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources*, No. 29 (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1995 [王辑, 陆松年, 李惠民, 等. 天津地质矿产研究所所刊, 第29号. 北京: 地质出版社, 1995]
- 52 Zhang J, Ma Z J, Ren W J. Re-discussion on natures of extension in Helanshan region before Cenozoic era (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2004, 25: 8–17 [张进, 马宗晋, 任文军. 再论贺兰山地区新生代之前拉张活动的性质. 石油学报, 2004, 25: 8–17]
- 53 Zhao Z Y, Liu C Y. Extend the residual basin within craton and oil-gas properties—A case study of Ordos Basin and Sichuan Basin. In: *Geological Society of China, ed. Collected Papers of Scientific-Technological Result Communication of “Seventh Five”* (in Chinese). Beijing: Science and Technology Press, 1992. 610–613 [赵重远, 刘池洋. 残延克拉通内盆地及其含油气性——以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例. 见: 中国地质学会, 编. “七五”地质科技重要成果学术交流会议论文选集. 北京: 科学技术出版社, 1992. 610–613]
- 54 Liu C Y, Tan C Q, Sun W, et al. Study of Coexistence accumulation (ore) mechanism and distribution of multiple energy resources (in Chinese). In: Liu C Y, ed. *Study Progress of Coexistence Accumulation (ore) Mechanism of Multiple Energy Resources*. Beijing: Science Press, 2005. 1–16 [刘池洋, 谭成仟, 孙卫, 等. 多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律研究. 见: 刘池洋, 编. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展. 北京: 科学出版社, 2005. 1–16]
- 55 Zhang Y Q, Teng J W, Wang Q S, et al. Crustal structure and the geodynamic process beneath the Hetao basin and adjacent area (in Chinese). *Prog Geophys*, 2013, 28: 2264–2272 [张永谦, 滕吉文, 王谦身, 等. 河套盆地及其邻近地域的地壳结构与深层动力学过程. 地球物理学进展, 2013, 28: 2264–2272]
- 56 Zhang E H, Shi L, Luo J. Gravity isostasy of Ordos block and its surrounding regions (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2018, 40: 774–784 [张恩会, 石磊, 罗娇, 等. 鄂尔多斯地块及邻区重力均衡研究. 地震学报, 2018, 40: 774–784]
- 57 Ma X Y, Wu Z W, Tan Y J, et al. Basement structure of North China Platform (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 1979, 2: 293–304 [马杏垣, 吴正文, 谭应佳, 等. 华北地台基底构造. 地质学报, 1979, 2: 293–304]
- 58 Zhang B S, Wang Z. Wavy mosaic structure and relation to energy resources in China (in Chinese). *J Xi'an School Energy Min*, 1983, 5: 1–13 [张伯声, 王战. 波浪状镶嵌构造同中国能源资源分布的关系. 西安矿业学院学报, 1983, 5: 1–13]
- 59 Ma Z J, Wang G Q. Strip-trip tectonic division of contemporary lithospheric of eastern China (in Chinese). *Geol J China Univ*, 1999, 5: 7–16 [马宗晋, 王国权. 中国大陆东部现今岩石圈结构的板条构造分区. 高校地质学报, 1999, 5: 7–16]
- 60 Li W H, Zhang Q, Chen Q, et al. Sedimentary evolution of Early Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas (in Chinese). *J Northwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 50: 456–479 [李文厚, 张倩, 陈强, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区早古生代沉积演化. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50: 456–479]
- 61 Wang J Q, Liu C Y, Zhao H G, et al. Uplift and exhumation events and thermochronological constraints at the end of Triassic in southwestern Ordos Basin (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 1199–1212 [王建强, 刘池洋, 赵红格, 等. 鄂尔多斯盆地西南部三叠纪末抬升剥蚀事件及热年代学记录. 岩石学报, 2020, 36: 1199–1212]
- 62 Tang X Y, Guo Z M, Chen H L. Thrust Structure and Oil-Gas Exploration in Western Margin of Shan-Gan-Ning Basin (in Chinese). *Xi'an:*

- Northwest University Press, 1992 [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. 西安: 西北大学出版社, 1992]
- 63 Liu S F, Ke A R, Wu L Y, et al. Sediment provenance analysis and its tectonic significance in the foreland basin of the Ordos southwestern margin (in Chinese). *Acta Sedimentol Sin*, 1997, 27: 156–160 [刘少峰, 柯爱蓉, 吴丽云, 等. 鄂尔多斯西南缘前陆盆地沉积物物源分析及其构造意义. 沉积学报, 1997, 27: 156–160]
 - 64 Dong Y P, Zhang G W, Sun S S, et al. The “cross-tectonics” in China continent: Formation, evolution and its significance for continental dynamics (in Chinese). *J Geomech*, 2019, 25: 769–797 [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. 地质力学学报, 2019, 25: 769–797]
 - 65 Zhang B S, Wang Z. On Earth’s crustal wavy movement (in Chinese). *J Xi’an Coll Geol*, 1984, 9: 9–17 [张伯声, 王战. 论地壳的波浪运动. 西安地质学院学报, 1984, 9: 9–17]
 - 66 Zhang B S, Tang X Y. Mosaic structure and wavy motion of Ordos block and its adjacent regions (in Chinese). *J Northwest Univ (Nat Sci Ed)*, 1975, 5: 89–109 [张伯声, 汤锡元. 鄂尔多斯地块及其四周的银嵌构造与波浪运动. 西北大学学报(自然科学版), 1975, 5: 89–109]
 - 67 Chen G D, Peng S L, Dai T G. Historistic-dynamic tectonic differentiation of E-W of central Asia continental crustbody and its significance (in Chinese). *Geotect Metall*, 2005, 29: 7–16 [陈国达, 彭省临, 戴塔根. 亚洲大陆中部壳体东、西部历史-动力学的构造分异及其意义. 大地构造与成矿学, 2005, 29: 7–16]
 - 68 Yang F Z, Hu S R. Meso-Cenozoic tectonic evolution and oil-gas exploration (in Chinese). *Petrol Geol Xinjiang*, 2001, 22: 192–195 [杨福忠, 胡社荣. 六盘山盆地中、新生代构造演化和油气勘探. 新疆石油地质, 2001, 22: 192–195]
 - 69 Ma Z J, Du P R, Gao X L, et al. Analysis of earthquake distributions in East Asia and in the world (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2010, 17: 215–232 [马宗晋, 杜品仁, 高祥林, 等. 东亚与全球地震分布分析. 地学前缘, 2010, 17: 215–232]
 - 70 Ma Z J, Zheng D L. The Chinese-Mongolian continental mid-axis tectonic belt and its seismicity (in Chinese). *J Seismol Res*, 1981, 4: 421–436 [马宗晋, 郑大林. 中蒙大陆中轴构造带及其地震活动. 地震研究, 1981, 4: 421–436]
 - 71 Zhao Z Y. Formation-tectonic evolution and tectonic stress mechanism of western margin of the Ordos Basin (in Chinese). In: Zhao Z Y, Liu C Y, eds. *Formation, Tectonic Evolution and Oil-gas Occurrence*. Xi’an: Northwest University Press, 1990. 107–114 [赵重远. 鄂尔多斯地块西缘演化及其板块应力机制初探. 见: 赵重远, 刘池洋, 编. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存. 西安: 西北大学出版社, 1990. 107–114]
 - 72 Dong Y, Zhang G, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *J Asian Earth Sci*, 2011, 41: 213–237
 - 73 Zhao J F, Liu C Y, Nigel M, et al. Uplifting timing and tectonic evolution of the Lüliang Mountains (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2015, 45: 1427–1438 [赵俊峰, 刘池洋, Nigel M, 等. 吕梁山隆升时限与演化过程研究. 中国科学: 地球科学, 2015, 45: 1427–1438]
 - 74 Li S B, Wang Y J, Zhang Y Z, et al. Meso-Cenozoic uplifting of South Taihang Mountains: Constraints from apatite fission track data (in Chinese). *Geotect Metall*, 2015, 39: 460–469 [李庶波, 王岳军, 张玉芝, 等. 太行山中新生代隆升过程: 磷灰石裂变径迹证据. 大地构造与成矿, 2015, 39: 460–469]
 - 75 Zhai M G, Meng Q R, Liu J M. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2004, 11: 285–298 [翟明国, 孟庆任, 刘建明. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 2004, 11: 285–298]
 - 76 Dong S W, Zhang Y Q, Li H L, et al. “Yanshanian Movement” and Late Mesozoic multi plate converging tectonics in East Asia—Commemorate the 90th anniversary of the Yanshanian Movement (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2019, 49: 913–938 [董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 913–938]
 - 77 Zhang C L, Gou L L, Bai H F, et al. New thinking and understanding for the researches on the basement of Ordos Block (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2021, 37: 162–184 [张成立, 苟龙龙, 白海峰, 等. 鄂尔多斯地块基底研究新的思考与认识. 岩石学报, 2021, 37: 162–184]
 - 78 Zhai M G, Hu B, Peng P, et al. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2014, 21: 100–119 [翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 2014, 21: 100–119]
 - 79 Hu B, Zhai M, Li T, et al. Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Res*, 2012, 22: 828–842
 - 80 Fan H R, Yang K F, Hu F F, et al. Zircon geochronology of basement rocks from the Bayan Obo area, Inner Mongolia, and tectonic implications (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2010, 26: 1342–1350 [范宏瑞, 杨奎锋, 胡芳芳, 等. 内蒙古白云鄂博地区基底岩石锆石年代学及对构造背景的指示. 岩石学报, 2010, 26: 1342–1350]
 - 81 Duan R H, Liu C H, Shi J R. Studies on metamorphic zircons of granitic gneisses and amphibolites in the Dengkou and Shetai areas of the khondalite belt of the North China Craton: More constraints on its northern boundary (in Chinese). *Earth Sci*, 2020, 45: 3386–3402 [段瑞涵, 刘超辉, 施建荣. 华北克拉通孔兹岩带磴口和余太地区花岗岩片麻岩和斜长角闪岩变质锆石对其北界位置的再约束. 地球科学, 2020, 45: 3386–3402]
 - 82 Peng P, Wang X P, Zhou X T, et al. Identification of the ~810 Ma Qianlishan mafic dyke swarm and its implication for geological evolution of the western North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2018, 34: 1191–1203 [彭澎, 王欣平, 周小童, 等. 8.1亿年千里山基性岩墙群的厘定及其对华北克拉通西部地质演化的启示. 岩石学报, 2018, 34: 1191–1203]

- 83 Wang H Z, Zhang H F, Zhai M G, et al. Granulite facies metamorphism and crust melting in the Huai'an terrane at ~1.95 Ga, North China Craton: New constraints from geology, zircon U-Pb, Lu-Hf isotope and metamorphic conditions of granulites. *Precambrian Res*, 2016, 286: 126–151
- 84 Wu J L, Zhang H F, Zhai M G, et al. Discovery of pelitic high-pressure granulite from Manjinggou of the Huai'an Complex, North China Craton: Metamorphic P-T evolution and geological implications. *Precambrian Res*, 2016, 278: 323–336
- 85 Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, et al. Paleoproterozoic granulites from the Xinghe graphite mine, North China Craton: Geology, zircon U-Pb geochronology and implications for the timing of deformation, mineralization and metamorphism. *Ore Geol Rev*, 2014, 63: 478–497
- 86 Tang H, Chen Y. Global glaciations and atmospheric change at ca. 2.3 Ga. *Geosci Front*, 2013, 4: 583–596
- 87 Zhong Y, Chen Y L, Zhai M G, et al. Stratigraphic correlation and lithofacies paleogeography of khondalite series in the western North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 713–726 [钟焱, 陈雅丽, 翟明国, 等. 华北克拉通西部古元古代孔兹岩系的地层对比、岩相古地理特征及其地质意义. 岩石学报, 2016, 32: 713–726]
- 88 Jin W, Li S X, Liu X S. A study on characteristics of early Precambrian high-grade metamorphic rock series and their metamorphic dynamics (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1991, 7: 27–35 [金巍, 李树勋, 刘喜山. 内蒙大青山地区早前寒武纪高级变质岩系特征和变质动力学. 岩石学报, 1991, 7: 27–35]
- 89 Lu L Z, Jin S Q. *P-T-t* paths and tectonic history of an early Precambrian granulite facies terrane, Jining district, south-east Inner Mongolia, China. *J Metamorph Geol*, 1993, 11: 483–498
- 90 Liu X S, Jin W, Li S X, et al. Two types of Precambrian high-grade metamorphism, Inner Mongolia, China. *J Metamorph Geol*, 1993, 11: 499–510
- 91 Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, et al. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 1999, 310: 37–53
- 92 Yin C, Zhao G, Guo J, et al. U-Pb and Hf isotopic study of zircons of the Helanshan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Lithos*, 2011, 122: 25–38
- 93 Yin C, Zhao G, Sun M, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2009, 174: 78–94
- 94 Yin C, Zhao G, Wei C, et al. Metamorphism and partial melting of high-pressure pelitic granulites from the Qianlishan Complex: Constraints on the tectonic evolution of the Khondalite Belt in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2014, 242: 172–186
- 95 Guo J H, Peng P, Chen Y, et al. UHT sapphirine granulite metamorphism at 1.93–1.92 Ga caused by gabbro intrusions: Implications for tectonic evolution of the northern margin of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2012, 222–223: 124–142
- 96 Jiao S J, Guo J H, Harley S L, et al. New constraints from garnetite on the *P-T* path of the Khondalite Belt: Implications for the tectonic evolution of the North China Craton. *J Petrol*, 2013, 54: 1725–1758
- 97 Jiao S J, Guo J H, Wang L J, et al. Short-lived high-temperature prograde and retrograde metamorphism in Shaerqin sapphirine-bearing metapelites from the Daqingshan terrane, North China Craton. *Precambrian Res*, 2015, 269: 31–57
- 98 Jiao S J, Guo J H. Mineralogical characteristics of sapphirine and application in investigating ultrahigh-temperature (UHT) metamorphism (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2019, 35: 16–30 [焦淑娟, 郭敬辉. 假蓝宝石(Sapphirine)的矿物学特征及其在超高温变质作用研究中的应用. 岩石学报, 2019, 35: 16–30]
- 99 Jiao S, Fitzsimons I C W, Guo J. Paleoproterozoic UHT metamorphism in the Daqingshan Terrane, North China Craton: New constraints from phase equilibria modeling and SIMS U-Pb zircon dating. *Precambrian Res*, 2017, 303: 208–227
- 100 Li X P, Wang H, Kong F M. Probe into the genesis of high temperature-ultrahigh temperature metamorphism: The enlightenment from the Western Khondalite Belt of the North China Craton and the Namaqua mobile belt and the Bushveld metamorphic complex of South Africa (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2019, 35: 295–311 [李旭平, 王晗, 孔凡梅. 高温-超高温变质作用成因研究——来自华北克拉通西部孔兹岩带和南非Kapaavaal克拉通西南部Namaqua活动带与Bushveld变质杂岩体的启示. 岩石学报, 2019, 35: 295–311]
- 101 Cai J, Liu F L, Liu P H, et al. Geochronology of the Paleoproterozoic khondalite rocks from the Wulashan-Daqingshan area, the Khondalite Belt (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2015, 31: 3081–3106 [蔡佳, 刘福来, 刘平华, 等. 内蒙古孔兹岩带乌拉山-大青山地区古元古代孔兹岩系年代学研究. 岩石学报, 2015, 31: 3081–3106]
- 102 Kusky T M, Polat A, Windley B F, et al. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: A record of outward growth of Precambrian continents. *Earth-Sci Rev*, 2016, 162: 387–432
- 103 Zhai M G, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Res*, 2011, 20: 6–25
- 104 Gan B P, Diwu C R, Wang B L, et al. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic granites from the Helanshan region: Constrains on the formation and evolution of khondalite belt in the western North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2019, 35: 2325–2343 [甘保平, 第五春荣, 王伯隆, 等. 贺兰山古元古代花岗岩年代学及地球化学特征: 对华北克拉通西部孔兹岩带形成和演化的制约. 岩石学报, 2019, 35: 2325–2343]
- 105 Hu N G, Yang J X. Geochemical characteristics of the Helanshan group metamorphic rocks (in Chinese). *Mineral Sin*, 1995, 15: 104–110 [胡能

- 高, 杨家喜. 贺兰山群变质岩的地球化学特征. 矿物学报, 1995, 15: 104–110]
- 106 Lu L Z, Xu X C, Liu F L. Early Precambrian Khondalite Series in Northern Part of China (in Chinese). Changchun: Changchun Press, 1996. 1–280 [卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1996. 1–280]
 - 107 Zhou X W, Zhao G C, Geng Y S. Helanshan high pressure pelitic granulite: Petrologic evidence for collision event in the western block of the North China Craton (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2010, 26: 2113–2121 [周喜文, 赵国春, 耿元生. 贺兰山高压泥质麻粒岩-华北克拉通西部陆块拼合的岩石学证据. 岩石学报, 2010, 26: 2113–2121]
 - 108 Zhou X W, Geng Y S. Metamorphic age of khondalite series in the Helanshan region: Constrains on the evolution of the western block in the North China Craton (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2009, 25: 1843–1852 [周喜文, 耿元生. 贺兰山孔兹岩系的变质时代及其对华北克拉通西部陆块演化的制约. 岩石学报, 2009, 25: 1843–1852]
 - 109 Li L M, Zeng Z X, Lu Y J, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Zhaochigou Formation-complex in the Helan Mountain and its tectonic significance (in Chinese). Chin Sci Bull, 2014, 59: 593–604 [李黎明, 曾佐勋, 陆彦俊, 等. 孔兹岩系-贺兰山中段赵池沟岩组碎屑锆石LA-ICPMS锆石U-Pb年代学、Hf同位素组成及其地质意义. 科学通报, 2014, 59: 593–604]
 - 110 Shaanxi Province Geology and Mining Bureau. Geology of Shaanxi Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989 [陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989]
 - 111 Chinese Editorial Board of Stratigraphic Code. Chinese Stratigraphic Lexicon: Archean (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1–75 [中国地层典编委会. 中国地层典——太古宇. 北京: 地质出版社, 1996. 1–75]
 - 112 Diwu C, Sun Y, Zhao Y, et al. Early Paleoproterozoic (2.45–2.20 Ga) magmatic activity during the period of global magmatic shutdown: Implications for the crustal evolution of the southern North China Craton. Precambrian Res, 2014, 255: 627–640
 - 113 Huang X L, Wilde S A, Zhong J W. Episodic crustal growth in the southern segment of the Trans-North China Orogen across the Archean-Proterozoic boundary. Precambrian Res, 2013, 233: 337–357
 - 114 Jia X, Zhai M, Xiao W, et al. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton. Precambrian Res, 2020, 337: 105451
 - 115 Sun Q, Zhou Y, Wang W, et al. Formation and evolution of the Paleoproterozoic meta-mafic and associated supracrustal rocks from the Lushan Taihua Complex, southern North China Craton: Insights from zircon U-Pb geochronology and whole-rock geochemistry. Precambrian Res, 2017, 303: 428–444
 - 116 Yu X, Liu J, Li C, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis on the Taihua Complex: Constraints on the formation and evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Res, 2013, 230: 31–44
 - 117 Diwu C R, Sun Y, Lin C L, et al. LA-(MC-ICPMS) zircon U-Pb chronology and Hf isotopic compositions of the Taihua complex in Lushan area, Henan (in Chinese). Chin Sci Bull, 2010, 55: 2112–2123 [第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 等. 河南鲁山地区太华杂岩LA-(MC-ICPMS)锆石U-Pb年代学及Hf同位素组成. 科学通报, 2010, 55: 2112–2123]
 - 118 Pang Z S, Liang T Y, Xiao Z J. Geological characteristics of Xiaoshan granite-greenstone terrain (in Chinese). Geol Henan, 2000, 18: 32–37 [庞振山, 梁天佑, 肖中军. 崤山太古宙花岗-绿岩地体的地质特征. 河南地质, 2000, 18: 32–37]
 - 119 Yu J X. Division and comparison of Archean basement metamorphic rocks in Xiaoshan, Xiao-Qingling area (in Chinese). Geol Henan, 1998, 16: 106–133 [喻积贤. 小秦岭崤山地区晚太古代基底变质岩系划分与对比. 河南地质, 1998, 16: 106–133]
 - 120 Henan Province Geology and Mining Bureau. Geology of Henan Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989 [河南省地质矿产局. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989]
 - 121 Zhou Y, Zhao T, Sun Q, et al. Petrogenesis of the Neoproterozoic diorite-granite association in the Wangwushan area, southern North China Craton: Implications for continental crust evolution. Precambrian Res, 2019, 326: 84–104
 - 122 Kröner A, Compston W, Guo-wei Z, et al. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. Geology, 1998, 16: 211–215
 - 123 Lao Z Q, Wang S Y. New advances in the study of the Dengfeng complex in the Songshan region, Henan Province (in Chinese). Reg Geol China, 1999, 18: 9–16 [劳子强, 王世炎. 河南省嵩山地区登封岩群研究的新进展. 中国区域地质, 1999, 18: 9–16]
 - 124 Wan Y S, Liu D Y, Wang S Y, et al. Early Precambrian crustal evolution in the Dengfeng area, Henan Province (eastern China): Constrains from geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating (in Chinese). Acta Geol Sin, 2009, 83: 982–999 [万渝生, 刘敦一, 王世炎, 等. 登封地区早前寒武纪地壳演化——地球化学和锆石SHRIMP U-Pb年代学制约. 地质学报, 2009, 83: 982–999]
 - 125 Zhou Y Y, Zhao T P, Xue L W, et al. Geochemistry and origin of Neoproterozoic amphibolites in Songshan, Henan Province (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2009, 25: 3043–3056 [周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 等. 河南嵩山地区新太古代斜长角闪岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 2009, 25: 3043–3056]
 - 126 Shanxi Province Geology and Mining Bureau. Geology of Shanxi Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989 [山西省地质矿产局. 山西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989]
 - 127 Li Q G, Liu S W, Wang Z Q, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of the detrital zircons from the Jiangxian Group in the Zhongtiao Mountain

- and its tectonic significance (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2008, 24: 1359–1368 [李秋根, 刘树文, 王宗起, 等. 中条山绛县群碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb测年及其地质意义. *岩石学报*, 2008, 24: 1359–1368]
- 128 Zhu X, Zhai M, Chen F, et al. ~2.7-Ga crustal growth in the North China Craton: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Sushui complex in the Zhongtiao terrane. *J Geol*, 2013, 121: 239–254
 - 129 Zhang Z Q, Xue W Y, Chai J Z, et al. The geology characters of basement rocks in southwestern Zhongtiao Mountains. *Geol Surv Res*, 2003, 26: 193–198
 - 130 Tian W, Liu S W, Liu C H, et al. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of TTG rocks in Sushui complex from Zhongtiao mountains with its geological implications. *Prog Nat Sci*, 2006, 16: 492–500
 - 131 Liu S W, Zhang C, Li C H, et al. EPMA Th-U-Pb monazite dating of Zhongtiao and Lüliang Precambrian metamorphic complexes (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2007, 14: 64–74 [刘树文, 张臣, 刘超辉, 等. 中条山-吕梁山前寒武纪变质杂岩的独居石电子探针定年研究. *地学前缘*, 2007, 14: 64–74]
 - 132 Guo J, Guo D. Petrology and ore-bearing potential of the Zhongtiao formation of Zhongtiaoshan copper field at Yuanqu, Shanxi Province (in Chinese). *Environ Sci*, 2019, 8: 121–122 [郭俊, 郭丹. 山西垣曲中条山铜矿田中条群岩石学以及构造学的含矿性研究. *环境科学*, 2019, 8: 121–122]
 - 133 Geng Y S, Wan Y S, Shen Q H, et al. Chronological framework of the early Precambrian important events in the Lüliang area, Shanxi Province (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2000, 74: 216–223 [耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架. *地质学报*, 2000, 74: 216–223]
 - 134 Geng Y S, Yang C H, Song B, et al. Post-orogenic granites with an age of 1800 Ma in Lüliang area, North China Craton: Constraints from isotopic geochronology and geochemistry (in Chinese). *Geol J Chin Univ*, 2004, 10: 477–487 [耿元生, 杨崇辉, 宋彪, 等. 吕梁地区18亿年的后造山花岗岩: 同位素年代和地球化学制约. *高校地质学报*, 2004, 10: 477–487]
 - 135 Wan Y S, Geng Y S, Shen Q H, et al. Khondalite series—Geochronology and geochemistry of the Jiehekou Group in Lüliang area, Shanxi Province (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2000, 16: 49–58 [万渝生, 耿元生, 沈其韩, 等. 孔兹岩系——山西吕梁地区界河口群的年代学和地球化学. *岩石学报*, 2000, 16: 49–58]
 - 136 Wang H C, Miao P S, Kang J L, et al. New evidence for the formation age of the Lüliang Group (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 2313–2330 [王惠初, 苗培森, 康健丽, 等. 吕梁群时代归属新证据. *岩石学报*, 2020, 36: 2313–2330]
 - 137 Yu J H, Wang D Z, Wang C Y, et al. Ages of Lüliang Group and its metamorphism in Mt. Lüliang region, Shanxi Province: Evidences from single grain zircon U-Pb dating (in Chinese). *Geol Rev*, 1997, 43: 403–408 [于津海, 王德滋, 王赐银, 等. 山西吕梁群和其主变质作用的锆石U-Pb年龄. *地质论评*, 1997, 43: 403–408]
 - 138 Liu S, Li Q, Liu C, et al. Guandishan granitoids of the Paleoproterozoic Lüliang metamorphic complex in the Trans-North China Orogen: SHRIMP zircon ages, petrogenesis and tectonic implications. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 2009, 83: 580–602
 - 139 Trap P, Faure M, Lin W, et al. The Lüliang Massif: A key area for the understanding of the Palaeoproterozoic Trans-North China Belt, North China Craton. *Geol Soc*, 2019, 323(Suppl): 99–125
 - 140 Xiao L L, Clarke G, Liu F L, et al. Metamorphic records in the Lüliang metapelites of the Jiehekou Group: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. *Precambrian Res*, 2019, 332: 105415
 - 141 Zhao G, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Res*, 2008, 160: 213–226
 - 142 Liu S, Zhao G, Wilde S A, et al. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Res*, 2006, 148: 205–224
 - 143 Peng P, Guo J, Zhai M, et al. Genesis of the Hengling magmatic belt in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics. *Lithos*, 2012, 148: 27–44
 - 144 Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 577–595
 - 145 Qian J H, Wei C J. *P-T-t* evolution of garnet amphibolites in the Wutai-Hengshan area, North China Craton: Insights from phase equilibria and geochronology. *J Metamorph Geol*, 2016, 34: 423–446
 - 146 Qian J, Wei C, Zhou X, et al. Metamorphic *P-T* paths and new Zircon U-Pb age data for garnet-mica schist from the Wutai Group, North China Craton. *Precambrian Res*, 2013, 233: 282–296
 - 147 Wei C J. Paleoproterozoic metamorphism and tectonic evolution in Wutai-Hengshan region, Trans-North China Orogen (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 24–43 [魏春景. 华北中部造山带五台-恒山地区古元古代变质作用与构造演化. *地球科学*, 2018, 43: 24–43]
 - 148 Kusky T M, Windley B F, Polat A. Geological evidence for the operation of plate tectonics throughout the Archean: Records from Archean Paleo-Plate boundaries. *J Earth Sci*, 2018, 29: 1291–1303

Summary for “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”

Ordos Block (Basin) is a key to understand early continental evolution and tectonic regime of the North China Craton

Mingguo Zhai^{1,2,3,4}

¹ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

⁴ School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

The Ordos Block is one of the key elements of the North China Craton (NCC), and the Precambrian compositions and structures record the early-stage evolution of the NCC, such as cratonization of early continental crust, Paleoproterozoic mobile belts, Meso- and Neoproterozoic rifting, and platform development. Many basic issues on the early-stage tectonic evolution bear upon the Ordos Block. The following are some new achievements in fundamental geology of the Ordos Block. (1) Drill cores reveal that the Ordos Block possesses Neoarchean-Paleoproterozoic metamorphic basement. The Neoarchean granitic gneisses and Paleoproterozoic pelitic gneisses and granites of the Ordos Block are quite similar in geochemistry and metamorphism to the Paleoproterozoic metamorphic complexes and migmatite of the central and northern portions of the NCC. (2) The proto-Ordos Basin is an intra-cratonic basin with old crystalline basements. Precambrian sedimentary successions are mostly made with the Changcheng and Jixian systems, with the Qingbaikou and Nahua systems being largely absent. The Sinian or Ediacaran strata are partially preserved. The Paleozoic sequence of the Ordos Block is consistent with that of the rest parts of the NCC. (3) A Greater Ordos Basin existed in the Late Triassic, which extended eastward to the Bohai Gulf and Xuhuai belt. Precambrian basement rocks of the Lüliang and Taihang mountains were exhumed due to the NW-SE crustal shortening in the Mid-Late Jurassic, leading to the disruption of the Greater Ordos Basin. The Ordos Basin in a narrow sense was formed largely since the Late Jurassic. (4) The Ordos Basin proper is now surrounded by major active faults. Precambrian metamorphic rocks, which outcrop discontinuously beside the major faults, are compatible well with their counterparts in the other parts of the NCC in many respects like geochronology, geochemistry, and metamorphism. (5) The Ordos Block was in an extensional setting during Cretaceous and Cenozoic times, as manifested by rift basins, such as the Early Cretaceous rift zone in the western Ordos Basin and the Tertiary Shanxi, Weihe and Yinchuan grabens. The Lüliang and Taihang mountains were further uplifted as a result of crustal stretching. Recent studies confirm that the Ordos Block and the other parts of the NCC share the identical metamorphic basement and Mesoproterozoic-Paleozoic sedimentary sequences. Therefore, reconstructing tectonic history of the NCC should be based on careful analysis and logical explanation of geologic data as well as the reevaluation of some long-held conceptions. There have remained a number of disputes on how the North China continent originated and evolved. The Ordos Block can serve as an archive for solving the crux of the problems.

Ordos, peripheral basement, border faults, North China oldland, tectonic implication

doi: [10.1360/TB-2021-0113](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0113)