

鄂尔多斯盆地北部重磁场及其基底断裂特征研究

田 刚^{1, 2, 3, 4)}, 汶小岗^{2, 3)}, 薛海军^{2, 3)}, 马 丽^{1, 2)}, 蒲仁海⁴⁾,
宋立军⁵⁾, 陈 杰⁶⁾, 陈 硕^{1, 2, 3, 4)}, 吴大林³⁾, 杨明慧^{6)*}

1)陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西西安 710021;

2)自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西西安 710021;

3)陕西省煤田物探测绘有限公司, 陕西西安 710005;

4)西北大学地质系, 陕西西安 710069;

5)西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065;

6)中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘 要: 为了明确鄂尔多斯盆地北部基底断裂特征, 在分析其重磁场特征基础上, 采用小波多尺度分解和功率谱分析的方法获取了基底重磁异常场, 并对其基底断裂构造进行了综合识别和解释。研究发现盆地北部布格重力异常场呈东高西低、航磁场呈近东西、正负相间排列的特征; 盆内发育 28 条基底断裂, 整体上以 NE 向和 EW 向基底断裂为主, NW 和 SN 向基底断裂错断或斜交分布的构造格架; EW—NE 向基底断裂形成于~1.95 Ga 阴山地块与鄂尔多斯地块的陆陆碰撞事件, 其中新召北—泊尔江海子南(F4+F10)基底断裂带在中元古代之前是一条不同构造单元的分界线; SN—NW 向基底断裂是上述陆陆碰撞过程中形成的撕裂构造, 中元古代在近 EW 向拉张应力场下选择性激活。盆地北部基底断裂体系形成是不同陆块相互作用的产物, 并在后期选择性活化, 为研究华北克拉通化和再造过程提供了构造变形的证据。

关键词: 克拉通化和再造; 构造格架; 基底断裂; 基底重磁异常场; 鄂尔多斯盆地北部

中图分类号: P548 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.013101

Study on Gravity and Magnetic Fields and Characteristics of Basement Faults in the Northern Ordos Basin

TIAN Gang^{1, 2, 3, 4)}, WEN Xiaogang^{2, 3)}, XUE Haijun^{2, 3)}, MA Li^{1, 2)}, PU Renhai⁴⁾,
SONG Lijun⁵⁾, CHEN Jie⁶⁾, CHEN Shuo^{1, 2, 3, 4)}, WU Dalin³⁾, YANG Minghui^{6)*}

1) Shaanxi Coal Geology Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021;

2) Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization,
Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710021;

3) Shaanxi Coalfield Geophysical Prospecting and Surveying Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710005;

4) Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069;

5) School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065;

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

Abstract: To elucidate the characteristics of basement faults in the northern Ordos Basin, an analysis of its gravity and magnetic field characteristics was conducted. Wavelet multiscale decomposition and power spectrum analysis methods were used to comprehensively identify and interpret the obtained basement gravity and magnetic anomaly fields. The results reveal that the Bouguer Gravity anomaly field in the northern Ordos Basin exhibited higher values in the east and lower values in the west. Simultaneously, the aeromagnetic field was organized into zones of nearly east-west (EW) positive and negative. A total of 28 intra-basin basement faults were identified in the northern Ordos Basin, with north-east (NE) and EW trending basement faults being

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41172127; 41572102)、陕西省煤田地质集团科技管理部项目(编号: SMDZ-2022ZD-5; SMDZ-2023ZD-09)联合资助。

收稿日期: 2023-09-30; 改回日期: 2024-01-29; 网络首发日期: 2024-02-01。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 田刚, 男, 1991 年生。博士, 工程师。主要从事构造地质等相关研究工作。E-mail: 691561570@qq.com。

*通信作者: 杨明慧, 男, 1962 年生。博士, 教授。主要从事盆地构造分析等方面的教学和研究工作。E-mail: yangmh@cup.edu.cn。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

predominant, and NW and SN trending faults distributed in a staggered or oblique tectonic framework; The EW–NE basement fault originated from the continental collision event between the ~1.95 Ga Yinshan Block and the Ordos Block. The Xinzhaio North–Porjianghaizi South (F4+F10) basement fault zone serves as a boundary of different tectonic units before the Mesoproterozoic. Moreover, The SN–NW trending faults are a tearing structure formed during the continental collision process, selectively activated in the EW-trending tensile stress field in the Mesoproterozoic. The formation of the basement fault system in the northern Ordos Basin is attributed to the interaction between different continents and is selectively activated in later stages. This evidence of structural deformation contributes valuable insights into the study of the North China cratonization and reactivation process.

Key words: cratonization and reactivation; structural framework; basement fault; basement gravity and magnetic anomaly fields; northern Ordos Basin

断裂构造是一个恒久而弥新的地学研究领域。基底断裂是指切穿地壳上部变质结晶基底的断裂,它不仅是地壳长期构造变形信息的直接载体,而且往往控制着盆地各时期构造格局、岩浆活动和沉积地层的形成等,直接或间接影响着不同类型矿产资源的形成与分布(张文佑等, 1977; 魏文博等, 1993)。长期以来,鄂尔多斯盆地多被认为是一个盆缘断裂构造较发育、盆内构造变动微弱的稳定克拉通叠合盆地,但近年来随着地震勘探资料品质的不断提高,尤其是鄂尔多斯盆地北部地区,发现了由泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井等大型基底断裂组成的近东西向杭锦旗断裂带(图 1b; Yang et al., 2013, 2015b),并初步揭示了这些基底断裂构造-差异隆升活动与不同层系富集的油气、氦气、煤以及铀矿等多种能源矿产关系密切,引起学者们对盆地北部基底断裂系统的高度关注(姚宗惠等, 2003; Yang et al., 2015a; Bai et al., 2020; 何发岐等, 2022; 张威等, 2023a, b)。

目前,尽管多位学者已经依据航磁资料对盆地北部基底断裂进行了识别,总体上提出该地区发育了 EW、NE 和 NW 向三组基底断裂,但对其基底断裂位置、数量、形态的认识仍存在较大差别,且与地震资料识别中元古代近 SN 走向的断裂系统匹配不上(丁燕云, 2000; 潘爱芳等, 2005; 李明等, 2010; 何紫娟, 2013; 孙乃泉等, 2020; 张威等, 2023a),主要原因可能与航磁资料精度不高、布格重力资料多被忽视、缺乏有效基底异常场分离、识别基底断裂方法单一、地震资料验证少等因素有关。对于盆地北部 EW–NE 向构造,前人基于研究区断层平面分布与区域陆块拼合模式图推测其与~1.95 Ga 北部阴山地块沿 SWW–NEE 方向与鄂尔多斯地块碰撞拼合有关(王涛等, 2007; 田刚等, 2024),但并没有提供实际的证据。显然,盆地北部基底断裂系统整体再解释和认识对于探讨华北克拉通化和再造过程也至关重要。

本次研究应用小波多尺度分解和功率谱分析相结合方法对盆地北部重磁异常场进行逼近场和细

节场的分离,定量计算了各细节场的源体埋深,获取了盆地北部基底重磁异常场。对基底异常场进行位场边缘识别技术处理,并结合多条地震剖面 and 人工地震剖面的解释成果以及区域地质构造的认识,从平面和剖面上对盆内基底断裂进行了识别和分类。在明确基底断裂构造特征基础上,探讨了基底断裂之间的构造关系,以及它们对于前寒武纪华北克拉通西部陆块形成的构造意义。该研究有助于推进对盆地北部深部断裂构造特征和演化过程的认识,也为下一步克拉通盆地矿产资源勘探、克拉通化和再造过程构造变形的研究提供重要地质依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部,东接吕梁隆起、西临贺兰山冲断带,南、北分别隔新生代渭河盆地和河套盆地与秦岭造山带和阴山—燕山造山带相望(图 1a)。自古元古代中晚期鄂尔多斯地块相继与北部阴山陆块以及东侧东部陆块碰撞拼合形成稳定的华北克拉通基底后,在中元古代伸展构造背景下发育了晋陕、甘陕、宁蒙、贺兰等多个裂陷槽(Zhao et al., 2005; 冯娟萍等, 2018; 包洪平等, 2019)。古生代以来,鄂尔多斯盆地整体处于北古亚洲洋、西南特提洋和东滨太平洋三大不同构造域活动交汇的构造转化复合区带,相继经历了早古生代陆表海-陆缘海盆地、晚古生代内陆克拉通滨浅海盆地、中生代内陆坳陷盆地和中生代晚期尤其是新生代以来区域差异隆升-周缘断陷等多个演化阶段(郭忠铭等, 1994)。

鄂尔多斯盆地北部地区经历了上述相似区域构造演化过程,沉积盖层与全盆整体地层基本一致,但受北东继承性隆起带和杭锦旗断裂带差异活动的影响,也存在一定差异,表现为沉积地层多向隆起区尖灭或缺失(图 1b)。从老到新沉积地层主要包括中元古界长城系、中奥陶统马家沟组、上石炭统、二叠系、三叠系、中侏罗统、下白垩统志丹群(图 1b)。它们整体磁性很弱,区域磁异常很好反映了基底断裂特征的信息(田刚等, 2024)。此外,该地区

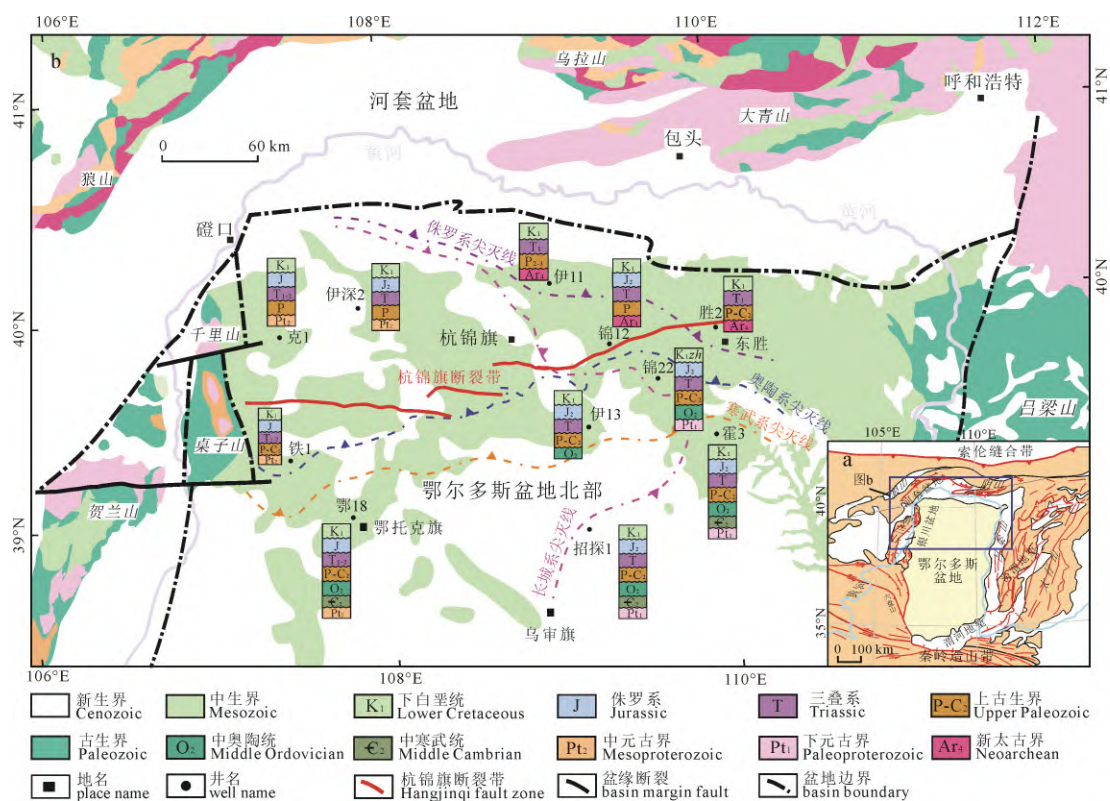


图 1 鄂尔多斯盆地北部构造位置(a)和区域地质构造图(b)
Fig. 1 Tectonic location (a) and regional Geologic map (b) of northern Ordos Basin

中西部中元古代发育了多个近 SN 走向的裂陷槽,造成中元古代地层厚度差异大(孙乃泉等, 2020; 张威等, 2023a), 布格重力异常特征明显, 也是基底断裂识别的重要指标。

2 重磁数据

2.1 数据前期处理

航磁 ΔT 异常和布格重力异常数据主体比例尺为 1: 20 万、局部为 1: 50 万, 并通过克里金网格化得到 2 km $\times$ 2 km 的规则网格(图 2 和图 3)。研究区

南北跨越地理纬度近 3°, 磁倾角和磁偏角变化大, 以纬度间隔 1°和经度间隔 2°, 将全区分成相互连接的 6 个带, 进行变磁倾角化极处理, 得到了盆地北部航磁 ΔT 化极异常场(图 2)。

2.2 小波多尺度分解

重磁异常场是地下所有地质体物性的综合反映, 为了获取基底重磁异常场, 采用对称性、紧支撑性较好的 Daubechies 小波(许家妹等, 2014)对盆地北部航磁化极异常和布格重力异常数据矩阵进行分解。与传统的方法相比, 小波多尺度分解方法可

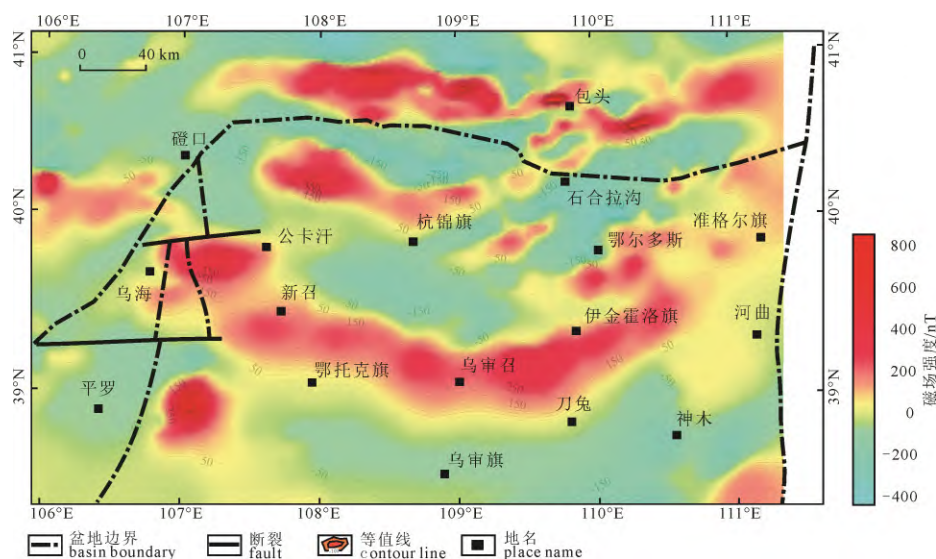


图 2 鄂尔多斯盆地北部航磁 ΔT 化极异常图
Fig. 2 Anomaly map of ΔT magnetic pole reduction in the northern Ordos Basin

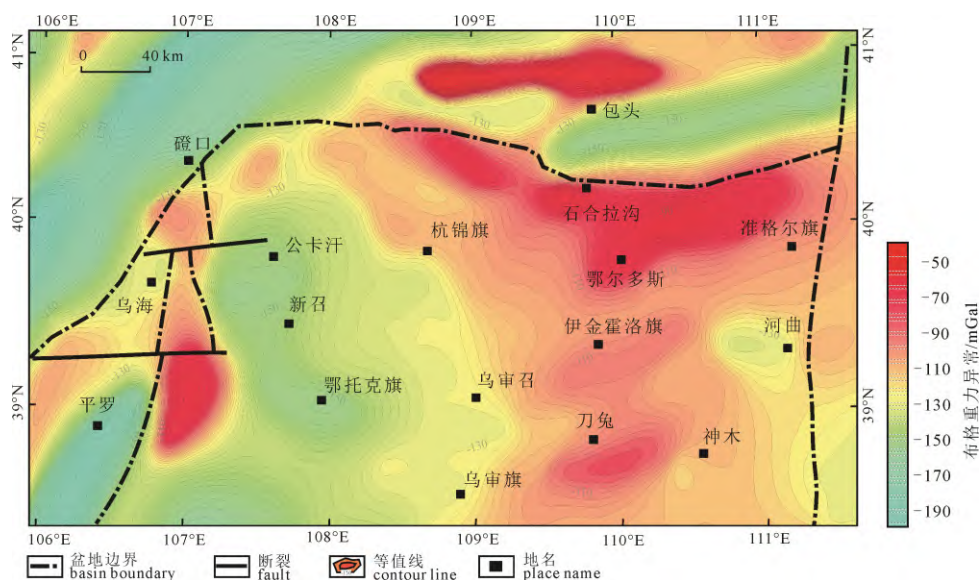


图3 鄂尔多斯盆地北部布格重力异常图

Fig. 3 Anomaly map of Bouguer gravity in the northern Ordos Basin

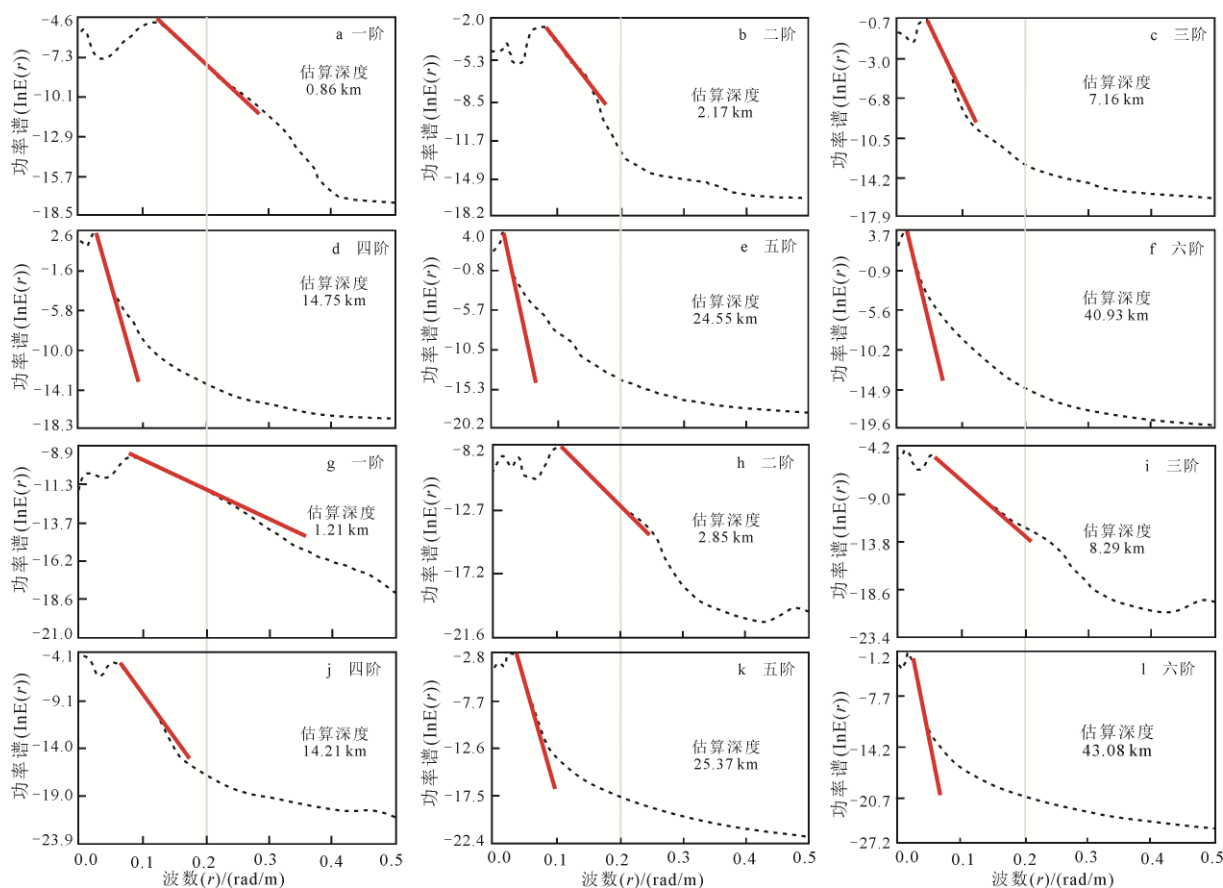


图4 鄂尔多斯盆地北部航磁(a~f)和布格重力(g~l)1~6阶小波细节功率谱图

Fig. 4 Power spectra of Magnetic (a~f) and Bouguer gravity (g~l) wavelet details from 1~6 in the northern Ordos Basin

以把位场异常分解成不同尺度的逼近场和细节场,并可结合功率谱法(Spector et al., 1970)建立分解场源与深度的对应关系,赋予了相应的地质意义(杨文采等, 2001)。重磁数据 T 经过一阶至 N 阶分解,可以得到 N 阶逼近数据 A_N , 代表地表某深度 H 以下,场源体磁异常的综合反映;细节数据 D_N 则代表两个相邻深度之间夹心层形成的异常响应,是一个既

滤除了浅层局部异常又滤除了深部背景异常之后所余下的异常(刘金兰, 2008)。当 N 阶与 $N-1$ 阶逼近场变化很小时,确定 N 为最终分解尺度的最大阶数(刁博等, 2007),进而将本次研究小波分解尺度定为6阶。同时采用对数功率谱方法计算1~6阶小波细节场对应的近似等效场源深度。从图4可以看出,随着分解阶次增大,直线段倾角越来越大,对应的

场源深度越来越深。钻井资料揭示盆地北部基底埋深总体呈东北浅、西南深, 约为 2~10 km, 基本与小波三阶和四阶细节异常深度相对应。因此, 本次研究着重介绍盆地北部重磁 3~4 阶细节场的特征。

2.3 航磁 ΔT 化极异常场和 3~4 阶细节场特征

从图 2 中可以看出, 新召—乌审召—伊金霍洛旗一带表现为近 EW 向、略向南凸出的高航磁异常条带, 局部异常值高达 500 nT; 公卡汗至伊金霍洛旗区域表现为 NW 较宽负磁异常条带, 局部异常值低至 -200 nT; 杭锦旗东部主要为 NE 向的负磁异常条带, 与公卡汗至伊金霍洛旗负磁异常条带相连, 整体构成了近 EW 向、向南突出的负异常带。杭锦旗北侧呈现出了近 EW 向、形似新召—乌审召—伊金霍洛旗高航磁异常条带, 但其东部高航磁异常呈串珠状排列, 明显较弱, 与盆缘包头同纬度 EW 向高航磁异常条带相连。准格尔旗至河曲航磁异常主要为正航磁异常带, 但异常值整体较低。宏观上看, 盆地北部区域航磁异常整体呈近 EW 向的正负条带状或串珠状展布。

在航磁 3~4 阶小波分解细节图上可以看出, 异常幅值形态以条带状、串珠状、团块状为主, 其中 3 阶细节图中航磁异常呈正负相间、交替出现的特征, 4 阶细节图磁异常平面样式基本与航磁化极异常图类似, 两者场源视深度在 2.17~14.75 km 之间, 很好

反映了上地壳基底结构特征(图 5a, b)。

2.4 布格重力异常场和小波 3~4 阶细节异常特征

鄂尔多斯盆地北部布格重力异常图(图 3)显示, 该区域的重力场异常在乌审旗—乌审召—杭锦旗以东主要表现为 NEE 向延伸的重力高区域, 其中东胜、伊金霍洛旗和神木西侧重力高异常尤为突出, 局部高达 -90 mGal; 以西地区表现为 NNW 向延伸的重力低区域, 尤其在鄂托克旗和新召—公卡汗区域重力异常低值尤为突出, 局部区域最小值达到 -160 mGal。重力场异常总体趋势表现为北东高、西南低, 具有明显的分区性, 与现今基底北东高、西南低趋势一致。在盆地北缘包头以南、西缘磴口以西和平罗地区重力等值线分别呈近 EW 向、NNE 向和 SN 向延伸, 都表现为重力低异常区, 对应于盆缘新生代的河套盆地和银川盆地。

从布格 3~4 阶小波细节图可以看出, 3 阶小波异常图中盆内中东部以 NE 向条带状为主, 西部公卡汗—鄂托克旗一线出现了近 SN 条带异常; 在 4 阶小波异常图中, 杭锦旗—乌审召地区 NW 转 SN 向异常条带异常明显, 盆缘包头和平罗也出现了十分醒目的重力低值带, 与新生代断陷盆地轮廓呈较好对应关系。总体而言, 3~4 阶小波细节异常对上地壳结构特征反映也更加直观, 主要为 2.85~14.21 km 的地质体产生的异常(图 5c, d)。

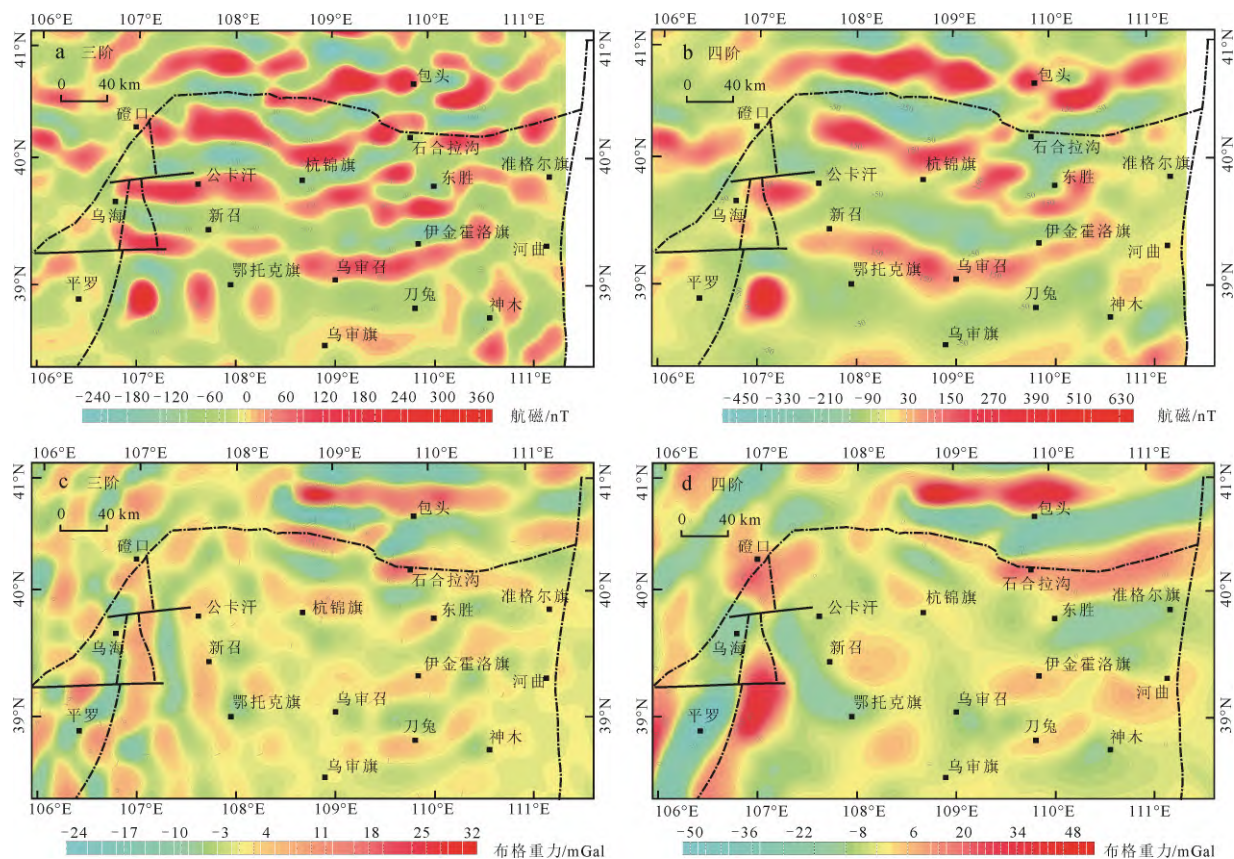


图 5 鄂尔多斯盆地北部航磁(a, b)和布格重力(c, d)小波多尺度分解 3~4 阶细节图

Fig. 5 Detailed map depicting the 3–4 orders of Magnetic (a, b) and Bouguer gravity (c, d) wavelet multiscale decomposition in the northern Ordos Basin

3 基底断裂识别与解释

3.1 基底断裂识别方法

为了提取基底重磁异常场反映的基底断裂构造

信息, 首先对盆地北部重磁小波三阶和四阶细节异常求取 0°、45°、90° 和 135° 不同方向的水平一阶导数(图 6a, b), 通过极值突出某一方向线性构造特征。然后分别对重磁小波三阶和四阶细节异常进行归一

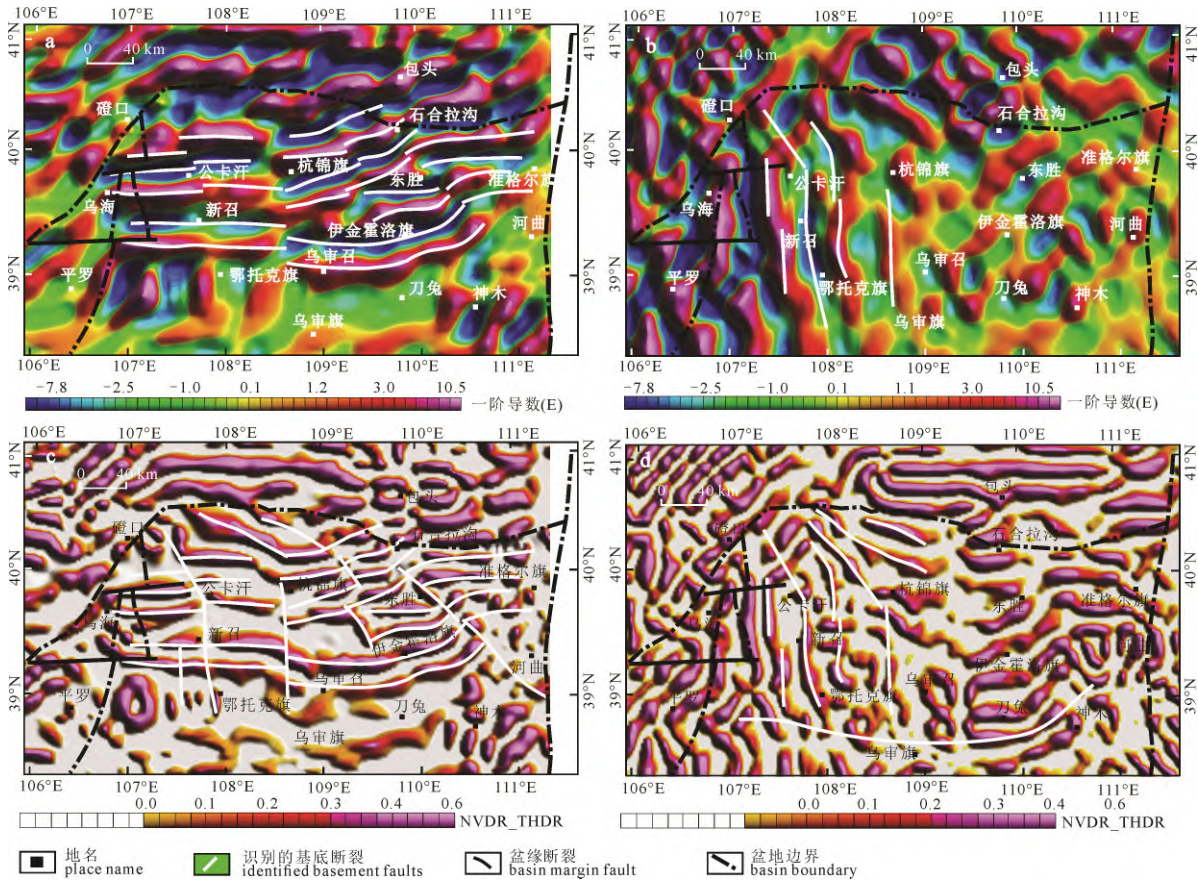


图 6 鄂尔多斯盆地北部航磁 3 阶细节水平一阶导数 135°方向基底断裂识别图(a), 布格 3 阶细节水平一阶导数 90°方向基底断裂识别图(b), 航磁 4 阶细节异常 NVDR_THDR 基底断裂识别图(c)和布格 3 阶细节异常 NVDR_THDR 基底断裂识别图(d)

Fig. 6 Identification map of basement faults in the northern Ordos Basin, showing the direction of 135° for the first derivative of the Magnetic 3-order detail level (a) and 90° for the first derivative of the Bouguer gravity 3-order detail level (b), NVDR_THDR basement fault identification map of the Magnetic 4-order detail anomaly (c) and the Bouguer 3-order detail anomaly (d)

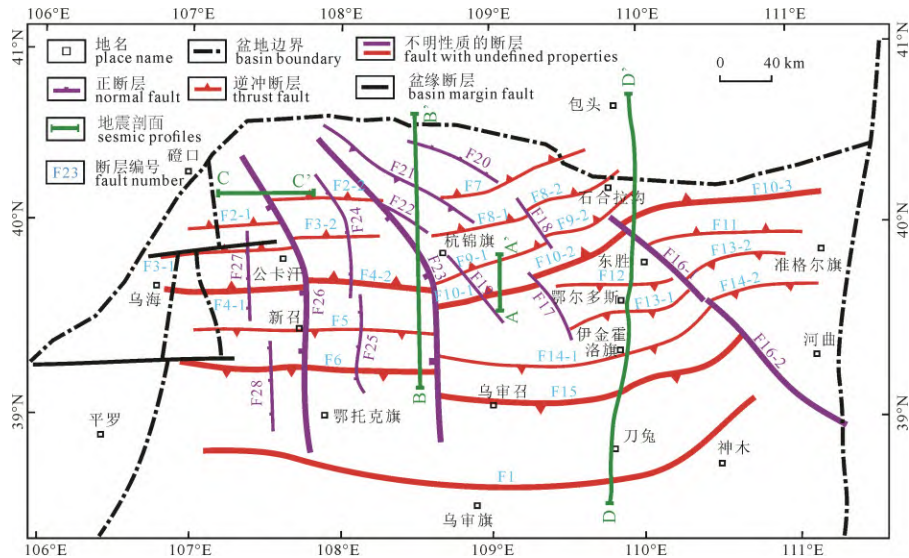


图 7 鄂尔多斯盆地北部基底断裂识别平面分布图

Fig. 7 Distribution map of basement fault identification in the northern Ordos Basin

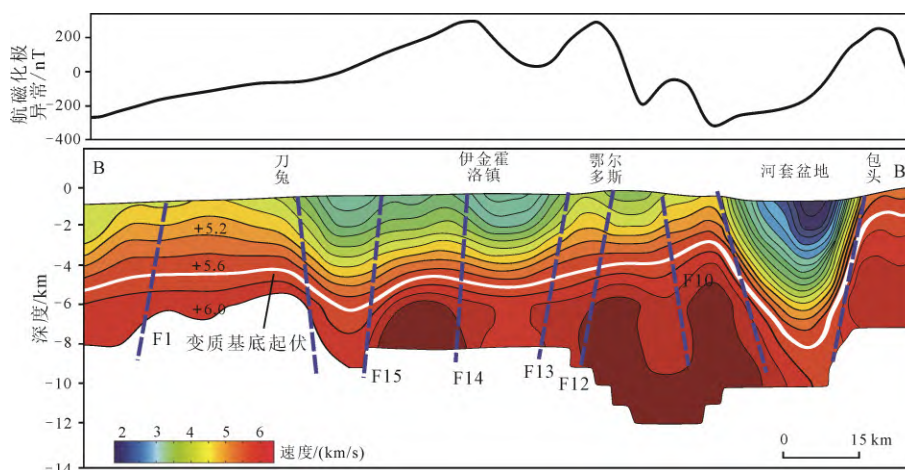


图 8 鄂尔多斯盆地北部人工地震基底断裂分布图(修改自滕吉文等, 2008)

Fig. 8 Distribution of basement faults of artificial earthquakes in the northern Ordos Basin (modified from TENG et al., 2008)

化总水平导数垂向导数(NVDR_THDR)(图 6c, d)计算, 通过极大值来识别线性构造。该方法提高了埋深较大地质体的识别能力, 更好突出线性构造位置(Wang et al., 2009)。最终结合其它重磁相关图件和地震剖面解释成果(图 8, 9), 确定基底断裂具体位置和产状, 厘定了盆地北部基底断裂构造体系(图 7)。

3.2 基底断裂平面分布特征

研究区解译出了盆内基底断裂 28 条(图 7), 按走向可明显分为 NE、EW、SN 和 NW 向等, 其中 NE 向断裂主要分布于盆地中东部, EW 向断裂主要分布于盆地中西部, 中间以一条大型 NNW—SN 向的基底断裂为分界线。SN 向断裂与 EW 向断裂类似, 主要分布于盆地中西部, 且大型 SN 向断裂多处明显错断 EW 向断裂。NW 向断裂在盆地内均有分布, 整体规模较小, 但多处可见它们错断 EW 向和 NE 向断裂。整体上盆地北部呈以 NE 向和 EW

向基底断裂为主, NW 和 SN 向构造斜交分布的构造格架, 显示了研究区内构造活动的多期性和复杂性。

3.3 基底断裂构造特征

(1) NE 向基底断裂

盆内 NE 向断裂(F7~F15)主要分布在盆地中东部, 与航磁化极异常图(图 2)和布格重力异常图上(图 3)显示盆地东部整体以 NE 走向异常条带一致; 在航磁小波 3~4 阶细节图(图 5a, b)显示为多个 NE 向正负相间排列或斜列的条带异常; 在盆地北部航磁 3~4 阶细节异常 135°方向水平一阶导数(图 6a)上显示为极值的连线, 在 NVDR_THDR 图上(图 6c)均表现为极大值的连线。NE 向基底断裂整体以泊尔江海子南断裂(F10)为分界, 南侧基底断裂多南倾, 北侧基底断裂多北倾(图 7), 部分基底断裂在人工地震剖面图速度等值线上表现为横向变化剧烈带(图 8), 在地震剖面上显示为断面高陡且向上延伸

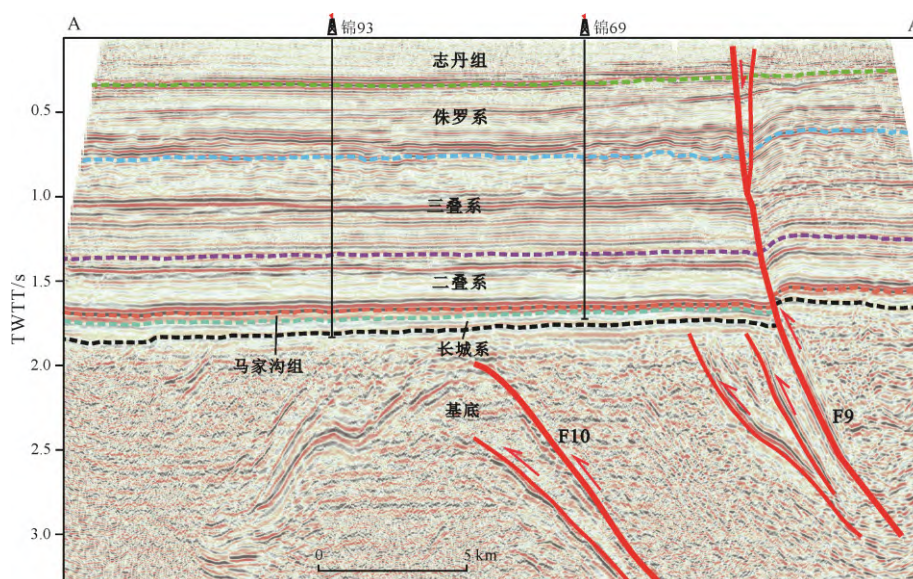


图 9 鄂尔多斯盆地北部 A—A'地震剖面解释图

Fig. 9 Interpretation map of the A—A' seismic profile in northern Ordos Basin

至盖层,甚至出露于地表,垂直断距多下逆上正,经历了多期构造活动(图9)。

以泊尔江海子断裂(F9)和泊尔江海子南断裂(F10)为例,A—A'地震剖面(图9)显示泊尔江海子断裂(F9)在变质结晶基底内是由三条北倾、宽约3 km的次级断裂组成,其中北侧次级断裂向上切穿盖层,并出露于地表,属于复活型-基底先存断裂。另外两条次级断裂与泊尔江海子南断裂(F10)类似,向上逐渐消失长城系底界面,在盖层期没有复活,属于基底先存断裂。在泊尔江海子南断裂(F10)南侧也发现了南倾的断裂,且与北倾断裂构成了对冲断裂构造组合样式。基于这些基底断裂与长城系角度不整合的接触关系,指示它们形成于长城纪之前,属于基底形成期在近SN向构造挤压应力体系下同期的收缩构造变形。

(2)EW向基底断裂

EW向断裂(F2~F6)主要分布在盆地中西部,在航磁小波3阶细节图表现为几条EW向异常条带相间分布,在盆地北部航磁3阶细节水平一阶导数0°方向图(图6a)表现为极值的连线,在航磁3~4阶细节异常NVDR_THDR图上(图6c),均表现为极大值的连线。B—B'地震剖面显示(图10a),新召北断裂(F4)北倾、新召断裂(F5)和鄂托克旗北断裂(F6)南倾,它们在中元古代长城纪发生了不同程度的伸展构造活动,但从剖面长城系从北向南地层厚度变化不大来看,这些EW向断裂并不是长城纪的控边断层。基于基底局部段地震反射特征发现(图10b),其内存在大量南倾的地震反射,宽度超40 km以上,并向上消失于长城系底界,揭示了EW向断裂与NE向断裂类似,都形成于长城纪之前;盖层期基底先存构造带存在选择性激活,其中部分EW向断裂在显生宙被多次激活,不同程度的控制着盆地北部的构造格局(Yang et al., 2013, 2015b)。在新召断裂(F5)上盘存在一个明显的地震反射界面,上、下部地震反射整体呈近垂直关系(图10b),反映了长城系沉积之前该地区局部发生了一期断陷活动。

(3)SN和NW向基底断裂

SN向断裂在布格重力3阶细节水平一阶导数90°方向图上表现为极值的连线(图6b),在布格异常3~4阶细节异常NVDR_THDR图上呈极大值的连线(图6d),在新召和公卡汗等局部段可见EW向断裂构造痕迹,指示EW向断裂构造受到SN向断裂改造。同时东胜东南部、杭锦旗和公卡汗西北部区域也发现了多条错断NE和EW向断裂的NW向断裂(图7),它们在NVDR_THDR图上呈极大值的连线(图6)。研究区中西部NW向断裂部分向南延伸过程中转变为SN向构造,如浩饶召—乌审召西断裂(F23)

和新召东断裂(F26)。在B—B'地震剖面(图10)和C—C'地震剖面上(图11),浩饶召—乌审召西断裂(F23)和新召东断裂(F26)均倾向西南、以铲式分别控制长城纪东断西超裂陷槽的沉积。依据基底内断裂处地震反射的宽度和产状,确定这两条断裂是近SN走向基底先存构造带在长城纪伸展构造背景下再活化形成(图10b和图11)。同时,这两个断裂上下盘二叠系、三叠系地层厚度存在一定差异,表明它们在显生宙也经历了多期不同性质的构造活动,但构造强度明显要比EW—NE向基底断裂构造活动弱。

4 讨论

4.1 基底断裂之间构造关系

从盆内基底断裂的空间分布来看(图7),这些EW向断裂(如F4、F5和F6)与NE向断裂(如F10、F14和F15)被NNW—SN向浩饶召—乌审召西断裂(F23)右行走滑错断,东段NE向断裂局部被NW向断裂改造发生偏移和错位,西段EW向断裂主要被NW—SN向新召东断裂(F26)左行错断,说明了NE和EW向断裂早期同属于一条大型断裂构造带,形成时间要早于NNW—SN向基底断裂。通过NE和EW向局部断裂构造与长城系角度不整合接触关系,证实了它们整体是长城纪之前(<1.8 Ga)近SN向构造挤压应力体系作用的产物。田刚等(2024)指出鄂尔多斯地块在古元古代中期(~1.95 Ga)与北部阴山地块沿NNW—SSE方向陆陆碰撞拼合(Zhao et al., 2005),导致鄂尔多斯地块四条一级基底断裂控制5个二级构造单元的内部构造格局形成,其中北部构造单元受到这种近SN向的碰撞改造最为强烈,形成了大量近EW—NE向构造,而中南部构造单元改造相对较弱,仍以NE向构造为主。本次研究确定了盆地北部存在大量EW—NE向基底断裂,其断裂走向、对冲组合型式和形成时间均符合上述推断的认识,进一步支持这些EW—NE向基底断裂形成于阴山地块与鄂尔多斯地块的陆陆碰撞事件。

目前地震剖面已经证实,研究区中西部发现了与上述近EW走向的孔兹岩带呈近垂直、SN走向、西倾的独贵、蒋家梁和百眼井等多个中元古代裂陷槽(孙乃泉等, 2020; 张威等, 2023a),揭示了近SN向基底断裂主要在长城纪构造活动。在巴西Tucano裂谷盆地也发现了这种与早期造山带边界走向近垂直的断陷存在,推测控陷断裂属于早期造山碰撞挤压过程中撕裂构造的活化(Milani et al., 1988)。研究区地震剖面上显示了浩饶召—乌审召西断裂(F23)和新召东断裂(F26)是SN走向先存构造局部铲式向下激活形成,控制盆地北部中元古代裂陷槽走向和分布,与巴西Tucano裂谷盆地形成机制类似。因此,

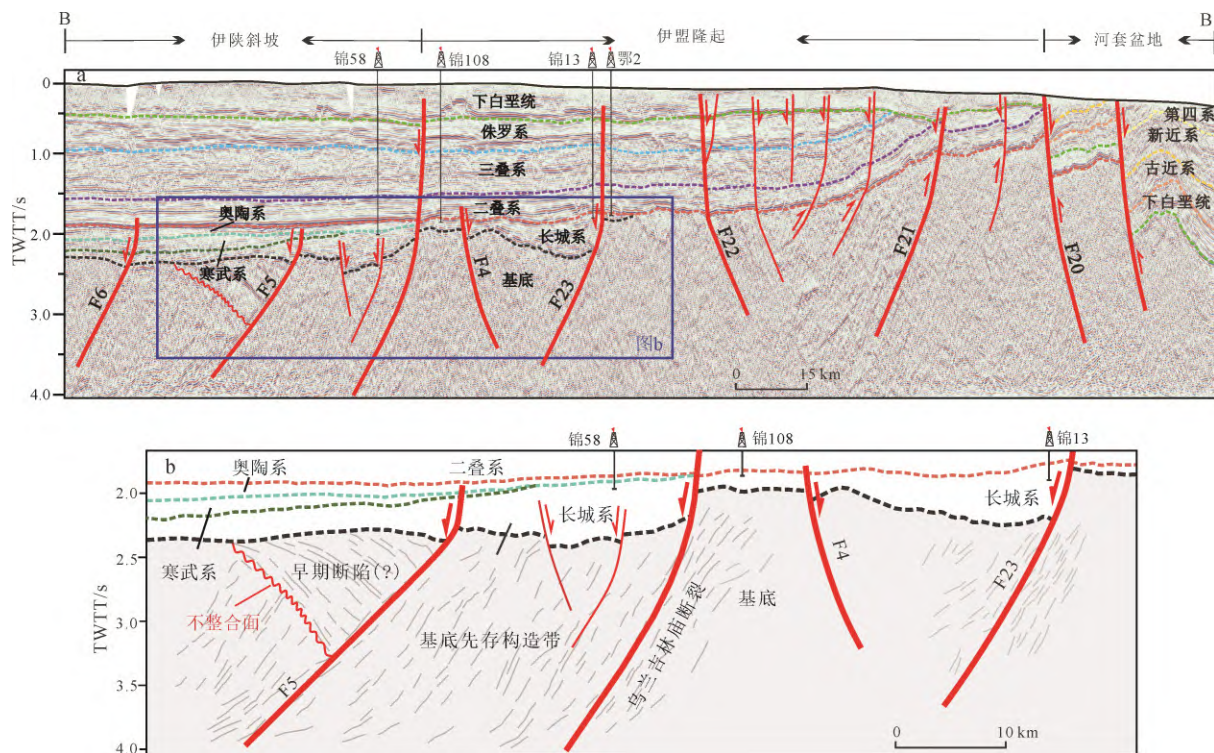


图 10 鄂尔多斯盆地北部 B—B'地震剖面解释图

Fig. 10 Interpretation map of B—B' seismic profile in the north Ordos Basin

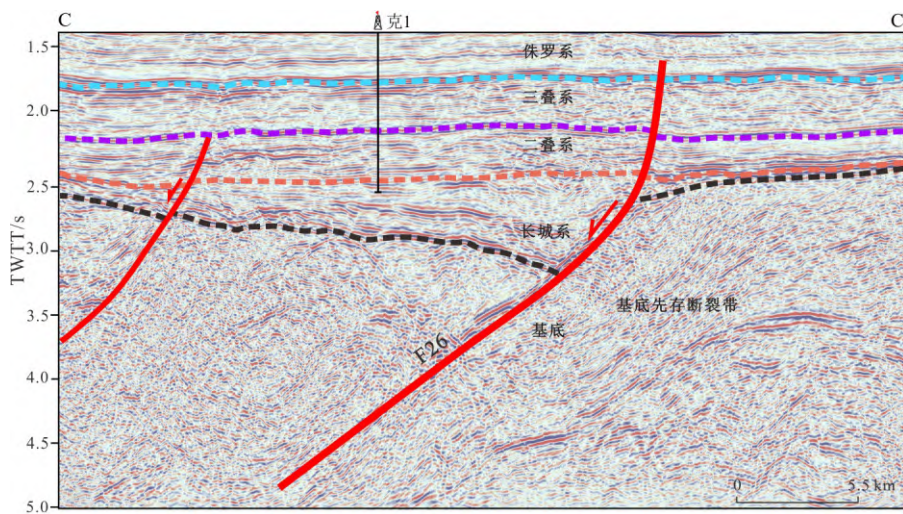


图 11 鄂尔多斯盆地北部 C—C'地震剖面解释图

Fig. 11 Interpretation map of C—C' seismic profile in the north Ordos basin

NNW—SN 向断裂切割了 EW—NE 向断裂, 可能是上述陆陆碰撞期间形成的撕裂构造, 中元古代在 EW 向拉张应力场下选择性激活(图 12)。盆地东部也发现了一条 NW 向延伸、长约 150 km 的榆树湾基底深大断裂(贺小元, 2012), 其位置大致对应于本次研究推断的河曲西—东胜断裂(F16)。根据裂变径迹年代学的研究, 认为该断裂可能在三叠纪以来开始活动。因此, 推断研究区东部 NW 向断裂被部分激活时间可能相对较晚。

4.2 新召北—泊尔江海子南断裂带的构造意义

盆内发育了多条 EW—NE 向基底断裂, 但它们

以新召北断裂(F4)和泊尔江海子南断裂(F10)为界, 北侧基底断裂多北倾、南侧基底断裂多南倾, 整体构成对冲断裂组合, 其中北侧胜 2 井、锦 12 井、锦 14 井、锦 15 井和锦 117 井基底岩样形成于新太古代晚期—古元古代早期(2.51~2.46 Ga), 南侧鄂 1 井、准 1 井、霍 3 井和招探 1 井基底岩样均形成于古元古代中期(2.2~1.95 Ga), 表现出了明显的岩石年龄差异(图 12; Tian et al., 2023)。孙少槐(2019)通过大地电磁测深阵列数据获取了鄂尔多斯盆地北部三维电阻率模型发现, 北部中上地壳存在一条近 EW—NE 向的高阻体 RO, 与新召北—泊尔江海子

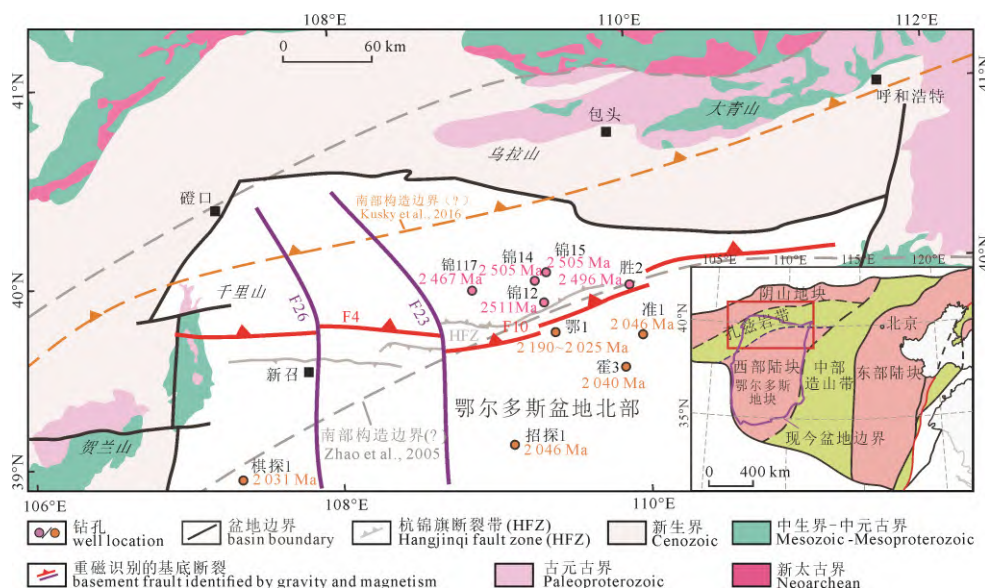


图 12 鄂尔多斯盆地北部基底断裂体系与西部陆块构造格架关系图(年龄数据引自 Tian et al., 2023)

Fig. 12 Relationship between the basement fault system in the northern Ordos Basin and the tectonic framework of the Western Block (dating data cited from Tian et al., 2023)

南断裂带位置相似。结晶基底变质岩的孔隙度和含水度一般较小、电阻率较大,整体为高阻层,但盆地北部内却显示出一条异常高阻带,表明其基底内横向岩体的不均一性,可能是不同地体之间在相互挤压应力作用下导致其构造边界电阻率值异常高的结果。同时对比 Zhao et al.(2005)提出的孔兹岩带和 Kusky et al.(2016)提出的内蒙古—河北造山带推测的南部构造边界,发现新召北—泊尔江海子南断裂带部分平行于内蒙古—河北造山带的南部边界,并与孔兹岩带的南部边缘部分重合(Zhao et al., 2005; Kusky et al., 2016)。尽管孔兹岩带南部构造边界的差异仍有待解决,但目前证据表明新召北—泊尔江海子南断裂带形成于阴山地块与鄂尔多斯地块的碰撞事件,可以作为不同构造单元的分界线(Tian et al., 2023)。杭锦旗断裂带作为上述先存构造带在盖层期复活型-基底断裂带,古生代以来控制着盆地北部构造-沉积格局(Yang et al., 2015b),与不同层系富集的多种能源矿产关系密切(Yang et al., 2015a; Bai et al., 2020),比目前流行以乌海—鄂托克旗—准格尔旗一线划分现今伊盟隆起和伊陕斜坡两大构造单元的边界更为合理(田刚等, 另文发表)。综上所述,鄂尔多斯盆地北部基底断裂体系的发育和定型是不同陆块间相互作用的产物,后期经历了不同程度的活化,为研究华北克拉通化和再造过程提供了构造变形的证据。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地北部航磁异常场呈近东西、正负相间排列的特征,反映了基底横向不均一性;重

力异常场总体趋势表现为北东高、西南低,具有明显的分区性,反映了研究区现今基底北东高、西南低的趋势。

(2)鄂尔多斯盆地北部重磁 3~4 阶细节异常反映 2~14 km 深度的场源信息,与其基底埋深类似,代表了基底重磁异常场的反映。

(3)鄂尔多斯盆地北部发育了 28 条盆内基底断裂,整体上以 NE 向和 EW 向基底断裂为主, NW 和 SN 向断裂错断或斜交分布的构造格架,揭示了研究区构造活动的多期性和复杂性。

(4)EW—NE 向基底断裂整体形成于~1.95 Ga 阴山地块与鄂尔多斯地块的陆陆碰撞事件,其中新召北—泊尔江海子南基底断裂带在中元古代之前是一条不同构造单元的分界线; NNW—SN 向断裂是上述陆陆碰撞过程中形成的撕裂断层,中元古代在近 EW 向拉张应力场下选择性激活。

(5)盆地北部基底断裂体系形成是不同陆块间相互作用的产物,后期经历了不同程度活化,为研究华北克拉通化和再造过程提供了构造变形的证据。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41172127 and 41572102), Shaanxi Coal Geology Group Co. Ltd. (Nos. SMDZ-2022ZD-5 and SMDZ-2023ZD-09).

参考文献:

- 包洪平, 邵东波, 郝松立, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化[J]. 地学前缘, 26(1): 33-43.
刁博, 王家林, 程顺有, 2007. 重力异常小波多分辨分析分解阶

次的确定[J]. 地球科学, 32(4): 564-568.

丁燕云, 2000. 鄂尔多斯盆地北部航磁反映的构造特征[J]. 物探与化探, 24(3): 197-202.

冯娟萍, 欧阳征健, 周义军, 等, 2018. 鄂尔多斯地区中元古界“拗拉槽”的重新厘定[J]. 西北大学学报(自然科学版), 48(4): 587-592.

郭忠铭, 张军, 于忠平, 1994. 鄂尔多斯地块油区构造演化特征[J]. 石油勘探与开发, 21(2): 22-29, 120.

何发岐, 王杰, 赵永强, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地东胜富氮气田成藏特征及其大地构造背景[J]. 古地理学报, 24(5): 937-950.

何紫娟, 2013. 重磁综合处理解释在鄂尔多斯区域构造中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 30-40.

贺小元, 2012. 鄂尔多斯盆地东北部榆树湾断裂带的构造特征及其意义[D]. 西安: 西北大学: 46-47.

李明, 高建荣, 2010. 鄂尔多斯盆地基底断裂与火山岩的分布[J]. 中国科学: 地球科学, 40(8): 1005-1013.

刘金兰, 2008. 重磁位场新技术与山西断陷盆地构造识别划分研究[D]. 西安: 长安大学: 52-64.

潘爱芳, 赫英, 黎荣剑, 等, 2005. 鄂尔多斯盆地基底断裂与能源矿产成藏成矿的关系[J]. 大地构造与成矿学, 29(4): 459-464.

孙乃泉, 李良, 蒲仁海, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区中元古界断陷—拗陷层地层特征[J]. 物探与化探, 44(5): 1144-1152.

孙少槐, 2019. 河套盆地与鄂尔多斯北缘深部电性结构特征及地热成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 50-52.

滕吉文, 王夫运, 赵文智, 等, 2008. 鄂尔多斯盆地上地壳速度分布与沉积建造和结晶基底起伏的构造研究[J]. 地球物理学报, 51(6): 1753-1766.

田刚, 杨明慧, 宋立军, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及演化过程新认识[J]. 地球科学, 49(1): 123-139.

王涛, 徐鸣洁, 王良书, 等, 2007. 鄂尔多斯及邻区航磁异常特征及其大地构造意义[J]. 地球物理学报, 50(1): 163-170.

魏文博, 刘天佑, 王传雷, 1993. 鄂尔多斯盆地构造演化和古构造运动面的地球物理研究[J]. 地球科学, 18(5): 643-652, 672.

许家姝, 刘立家, 刘银萍, 2014. Daubechies 多尺度小波分析技术及其在漠河盆地断裂带划分中的应用[J]. 地球物理学进展, 29(2): 595-602.

杨文采, 施志群, 侯遵泽, 等, 2001. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报, 44(4): 534-541, 582.

姚宗惠, 张明山, 曾令邦, 等, 2003. 鄂尔多斯盆地北部断裂分析[J]. 石油勘探与开发, 30(2): 20-23.

张威, 闫相宾, 刘超英, 等, 2023a. 鄂尔多斯盆地北部中元古界潜山圈闭特征与成藏模式[J]. 地质学报, 97(1): 168-178.

张威, 杨明慧, 李春堂, 等, 2023b. 鄂尔多斯盆地大牛地区块板内走滑断裂构造特征及演化[J]. 地球科学, 48(6): 2267-2280.

张文佑, 钟嘉猷, 1977. 中国断裂构造体系的发展[J]. 地质科学, (3): 197-209.

References:

BAI Donglai, YANG Minghui, LEI Zhibin, et al., 2020. Effect of tectonic evolution on hydrocarbon charging time: A case study from Lower Shihezi Formation (Guadalupian), the Hangjinqi area, northern Ordos, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 184(1): 106465.

BAO Hongping, SHAO Dongbo, HAO Songli, et al., 2019. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 26(1): 33-43(in Chinese with English abstract).

DIAO Bo, WANG Jialin, CHENG Shunyou, 2007. The Confirmation of Decomposition Level in Wavelet Multi-Resolution Analysis for Gravity Anomalies[J]. Earth Science, 32(4): 564-568(in Chinese with English abstract).

DING Yanyun, 2000. Structural characteristics of northern Ordos Basin reflected by aeromagnetic data[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 24(3): 197-202(in Chinese with English abstract).

FENG Juanping, OUYANG Zhengjian, ZHOU Yijun, et al., 2018. Revision of the Mesoproterozoic "Aulacogen" in Ordos Area[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 48(4): 587-592(in Chinese with English abstract).

GUO Zhongming, ZHANG Jun, YU Zhongping, 1994. The evolution characteristics of structure of the oil and gas bearing areas in Ordos Massif[J]. Petroleum Exploration and Development, 21(2): 22-29, 120(in Chinese with English abstract).

HE Faqi, WANG Jie, ZHAO Yongqiang, et al., 2022. Accumulation characteristics of Dongsheng helium-rich gas field in Ordos Basin and its tectonic background[J]. Journal of Palaeogeography, 24(5): 937-950(in Chinese with English abstract).

HE Xiaoyuan, 2012. Structural Characteristics and Significance of the Yushuan Fault Zone in the Northeast of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University: 46-47(in Chinese with English abstract).

HE Zijuan, 2013. The Application of Gravity and Magnetic data processing and interpretation in regional tectonic analysis of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 30-40(in Chinese with English abstract).

KUSKY T M, POLAT A, WINDLEY B F, et al., 2016. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: A record of outward growth of Precambrian continents[J]. Earth Science Reviews, 162(1): 387-432.

LI Ming, GAO Jianrong, 2010. Basement faults and volcanic rock distributions in the Ordos Basin[J]. Scientia Sinica(Terrae), 40(8): 1005-1013(in Chinese).

LIU Jinlan, 2008. Development New Technologies for Potential Field Processing and Research on the Tectonic Recognition & Division of Shanxi Fault Basin[D]. Xi'an: Chang'an University: 52-64(in Chinese with English abstract).

MILANI E J, DAVISON I, 1988. Basement control and transfer

- tectonics in the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, Northeast Brazil[J]. *Tectonophysics*, 154(1-2): 41-50, 53-70.
- PAN Aifang, HE Ying, LI Rongjian, et al., 2005. Relation between basement fractures and formation of energy resources in Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 459-464(in Chinese with English abstract).
- SPECTOR A, GRANT F S, 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. *Geophysics*, 35(2): 293-302.
- SUN Naiquan, LI Liang, PU Renhai, et al., 2020. The fault and depression characteristics of Mesoproterozoic strata in Hanggin Banner area, northern of Ordos Basin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 1144-1152(in Chinese with English abstract).
- SUN Shaohuai, 2019. A Study of Deep Electrical Structure Characteristics and Geothermal Genesis Mechanism in the Hetao Basin and Northern Margin of Ordos Block[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 50-52(in Chinese with English abstract).
- TENG Jiwen, WANG Fuyun, ZHAO Wenzhi, et al., 2008. Velocity distribution of upper crust, undulation of sedimentary formation and crystalline basement beneath the Ordos basin in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(6): 1753-1766(in Chinese with English abstract).
- TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al., 2023. Late Neoproterozoic plate subduction in Western North China Craton: Evidence from ca. 2.51 Ga to 2.46 Ga basement rocks in Northern Ordos Basin[J]. *Precambrian Research*, 387(4): 106979.
- TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al., 2024. New Understanding of Basement Structural Characteristics and Its Evolution Process in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 49(1): 123-139(in Chinese with English abstract).
- WANG Tao, XU Mingjie, WANG Liangshu, et al., 2007. Aeromagnetic anomaly analysis of Ordos and its adjacent regions and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(1): 163-170(in Chinese with English abstract).
- WANG Wanyin, PAN Yu, QIU Zhiyun, 2009. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data[J]. *Applied Geophysics*, 6(3): 226-233, 299.
- WEI Wenbo, LIU Tianyou, WANG Chuanlei, 1993. Geophysical study on tectonic evolution and paleotectonic moving surface of Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 18(5): 643-652, 672(in Chinese with English abstract).
- XU Jiashu, LIU Lijia, LIU Yinping, 2014. Daubechies multi-scale wavelet analysis method and the application in fault zone partition of Mohe basin[J]. *Progress in Geophysics*, 29(2): 595-602(in Chinese with English abstract).
- YANG Minghui, LI Liang, ZHOU Jin, et al., 2013. Segmentation and inversion of the Hangjinqi fault zone, the northern Ordos basin (North China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70-71(7): 64-78.
- YANG Minghui, LI Liang, ZHOU Jin, et al., 2015a. Structural Evolution and Hydrocarbon Potential of the Upper Paleozoic Northern Ordos Basin, North China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 89(5): 1636-1648.
- YANG Minghui, LI Liang, ZHOU Jin, et al., 2015b. Mesozoic structural evolution of the Hangjinqi area in the northern Ordos Basin, North China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 66(4): 695-710.
- YANG Wencai, SHI Zhiqun, HOU Zunze, et al., 2001. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(4): 534-541, 582(in Chinese with English abstract).
- YAO Zonghui, ZHANG Mingshan, ZENG Lingbang, et al., 2003. Analysis of the faults in the northern Ordos Basin, Northwest China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 30(2): 20-23(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wei, YAN Xiangbin, LIU Chaoying, et al., 2023a. Characteristics and reservoir forming model of Mesoproterozoic buried hill traps in the northern Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(1): 168-178(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wei, YANG Minghui, LI Chuntang, et al., 2023b. Structural characteristics and evolution of intraplate strike-slip faults in Daniudi Block, Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 48(6): 2267-2280(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wenyou, ZHONG Jiayou, 1977. On the Development of Fracture-systems in China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 197-209(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guochun, SUN Min, WILDE S A, et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202.