



# 内蒙古高原岩石圈构造研究

杨文采<sup>1)</sup>, 苏美霞<sup>2)</sup>, 杨波<sup>1)</sup>, 吴艳君<sup>2)</sup>, 王勤燕<sup>1)</sup>, 郭广飞<sup>2)</sup>, 刘书钰<sup>1)</sup>,  
孟晓玲<sup>2)</sup>, 陈勳韬<sup>1)</sup>, 施源<sup>1)</sup>, 彭中<sup>1)</sup>

1) 浙江大学地球科学学院, 浙江杭州, 310027; 2) 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古呼和浩特, 010020

**内容提要:** 本文通过综合地球物理资料, 对上、中、下地壳和岩石圈地幔属性的研究, 来分析内蒙古高原岩石圈的三维构造和物质运动。地体拼合属于岩石圈挤压力较小而作用期较长的造陆作用, 以内蒙古中部地区为典型代表。此区域现今包括南阿穆尔-兴安地体西南部和锡林浩特两个元古宙地体, 以及形成于太古宙的华北克拉通地体。索伦山-西拉木伦河断裂是锡林浩特和华北克拉通地体的缝合带。发生在二叠纪的锡林浩特和华北克拉通两个地体的碰撞拼合, 造成古亚洲洋南支的封闭, 同时也在两个地体之间, 形成了索伦山-西拉木伦缝合带和华北克拉通北缘俯冲带。古亚洲洋封闭后, 华北克拉通地体继续向锡林浩特地体下方陆-岛俯冲, 形成了宽度为 60~120 km 的华北克拉通北缘俯冲带。此俯冲带地层向北倾斜, 上地壳变形严重, 岩石圈地幔破裂充水。锡林浩特地体在石炭纪处于南阿穆尔-兴安地体南方古亚洲洋北支俯冲的岛弧带位置, 在二叠纪和华北拼合时又处于华南克拉通北方古亚洲洋南支俯冲的岛弧带位置, 幔源岩浆侵入频繁。在中生代拼合后又处于地壳转变为拉张的阶段, 幔源岩浆侵入作用有增无减。由于幔源岩浆侵入作用时间长久, 岩浆化学分异会更加彻底, 锡林浩特地体及其周边地区具有良好的成矿潜力。

**关键词:** 古亚洲洋; 陆-岛碰撞; 地体拼合; 内蒙古高原; 岩石圈构造

内蒙古高原位于古亚洲洋大陆拼合造山带南沿, 在古生代后期发生了多期陆-岛碰撞和岛-岛碰撞。陆和岛主要由空间尺度来区分; 陆指面积大于百万平方千米的大陆岩石圈, 岛指海洋中面积远小于百万平方千米的岩石圈。大陆拼合 (Continental amalgamation) 作用指大陆通过弱碰撞连接使它们之间的海洋封闭的地质作用, 海洋封闭过程主要由陆-岛碰撞和岛-岛碰撞作用完成 (杨文采等, 2014a, 2014b)。陆-陆碰撞改变全球大陆分布的格局, 而陆-岛碰撞改变的是洋陆转换带的分布格局。和陆-岛碰撞相似, 岛-岛碰撞也是由洋壳消减引起的, 改变的只是洋-陆转换带或大洋内部的局部格局。大陆强碰撞的典型地区如青藏高原和大别-苏鲁超高压变质带, 它们分别对应特提斯洋和古特提斯洋的封闭。大陆弱碰撞拼合的典型地区如内蒙古高原,

对应古亚洲洋封闭的最后阶段。因此, 详细研究内蒙古高原的岩石圈构造与陆-岛碰撞特点, 对大陆动力学研究具有重要意义。下面的讨论采用的大陆动力学学术语来自地球物理百科全书 (James, 1989), 有关的概念与传统的大地构造学有时是有区别的 (见第 5 节)。

古亚洲洋构造域 (Paleo-Asian tectonic domain) 指在古亚洲洋形成演化和最后封闭过程涉及的区域。它是一个发生在古生代的构造活动区域, 萨彦岭-额尔古纳碰撞带、天山-兴安碰撞带和内蒙古的索伦山-西拉木伦河缝合带, 都属于古亚洲洋构造域 (程裕淇, 1994; Warren et al., 2009)。古亚洲洋构造域的晚古生代-中生代岩浆岩分布面积巨大。大陆拼合的特点为碰撞期岩石圈挤压力较小而作用期较长 (万天丰, 2004; 马丽芳等, 2006)。由于

注: 本文为内蒙古自治区地质勘查基金项目 (编号 2017-YS02) 资助的成果。

收稿日期: 2021-09-24; 改回日期: 2021-12-17; 网络发表日期: 2022-03-28; 责任编辑: 蔡志慧。

作者简介: 杨文采, 男, 1942 年生。教授, 中国科学院院士, 主要从事地球物理正反演理论方法研究。E-mail: yang007@zju.edu.cn。通讯作者: 杨波, 男。副教授, 主要从事大地电磁法研究。E-mail: bo.yang@zju.edu.cn。

引用本文: 杨文采, 苏美霞, 杨波, 吴艳君, 王勤燕, 郭广飞, 刘书钰, 孟晓玲, 陈勳韬, 施源, 彭中. 2022. 内蒙古高原岩石圈构造研究. 地质学报, 96(5): 1599~1607, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022127.  
Yang Wencai, Su Meixia, Yang Bo, Wu Yanjun, Wang Qinyan, Guo Guangfei, Liu Shuyu, Meng Xiaoling, Chen Mengtao, Shi Yuan, Peng Zhong. 2022. Geophysical study on lithospheric structures of Inner Mongolia Plateau. Acta Geologica Sinica, 96(5): 1599~1607.

受挤压后登陆的洋陆转换带岩石圈充斥着裂缝裂隙和水分,成为下方幔源岩浆底侵的有利通道。Jahn (2004)用同位素地球化学方法对古亚洲洋构造域碰撞带花岗岩的来源与年龄进行了研究,指出古亚洲洋构造域碰撞带花岗岩来自亏损地幔,成岩年龄主要在 300~160 Ma 期间。而在蒙古和贝加尔地区,即蒙古-鄂霍次克带地区,成岩年龄主要在 270~160 Ma 期间。幔源岩浆底侵并逐渐分异,同时焊合了不同属性的地体,增加了大陆地壳的体积,形成新生的大陆岩石圈结晶基底。数据表面,古亚洲洋构造域具有显生宙最大规模的大陆增生地壳(苏美霞等,2020)。在大地构造学中,“地块”一词泛指在构造运动中运动大体一致的地壳物质体。为了表达准确一些,在本文中尽量用“地体”代替“地块”,它定义为在指定的动力学作用过程中内部物质运动连续变化的稳定地块,如在古亚洲洋闭合过程中内部物质运动连续变化的锡林浩特地块。

本文研究区位于内蒙古二连盆地及其周边地区(图 1)。二连盆地的构造包括苏尼特隆起以及腾格尔、乌兰察布、乌尼特和马尼特四个拗陷。苏尼特隆起的北部边界为二连-东乌旗断裂带,它穿过贺根山蛇绿岩体。腾格尔和乌兰察布拗陷的南界为索伦山-西拉木伦河断裂带,也含有索伦山等多个蛇绿岩体。因此,在这两条断裂带之间的地壳统称为锡林浩特地体。由于二连盆地沉积层的覆盖,锡林浩特地体的基底和岩石圈构造的研究主要依靠地球物理

资料。根据锡林浩特地体内出露的片麻岩年龄测定结果可知,锡林浩特基底生成在中元古代(1.6~1.5 Ga)。

研究内蒙古高原岩石圈涉及的科学问题很多,例如:① 古亚洲洋封闭的碰撞拼合带通过了二连盆地,具体的位置在哪里? ② 此碰撞拼合带的形成演化过程如何? 产生哪些地壳构造? ③ 拼合期有没有发生大陆的俯冲? 产生哪些结果? 由于本区有详细的地面重力和航空磁测的高精度数据,应用它们提取研究岩石圈构造与陆-岛碰撞作用的信息,可以对大陆动力学研究提供新认识。

## 1 根据航空磁测数据看地壳构造

航空磁测数据反映地壳结晶基底构造。内蒙古地区的航磁数据来自原中国国家地质总局航空物探大队不同测区 1:20 万的测量(国土资源航空物探遥感中心,2005),后来经过内蒙古地质调查院的标定和同化处理,经纬度范围分别为:东经 106°~118°,北纬 38°~45°,数据网格间距为:2 km×2 km。首先将航磁异常利用中纬度常规化极方法进行处理,获得的化极异常图如图 2 所示。在研究区航磁异常呈现明显的分带现象,场的梯度跃变带与区域地壳大断裂带位置对应;它们是二连-东乌旗断裂、锡林浩特地体内部断裂(部分为林西断裂)、索伦山-西拉木伦河断裂带、华北克拉通北缘古俯冲带和河北克拉通北部断裂。

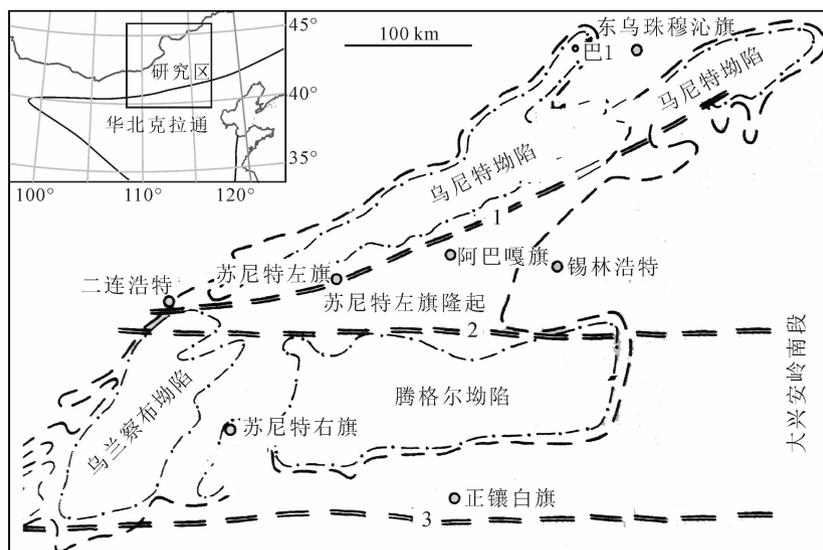


图 1 内蒙古高原研究区位置(左上角)及其构造分区

Fig. 1 The research area of Inner Mongolia Plateau (upper left) and its geological divisions

断裂带:1—二连-东乌旗断裂带;2—苏尼特隆起南缘断裂带;3—索伦山-西拉木伦河断裂带

The fault zones: 1—Erlian-Dongwuqi fault zone; 2—southern Sunite uplift fault zone; 3—Suolunshan-Xilamulunhe fault zone

需要说明的是,与地面地质图不同,岩石圈是三维的,因此地壳成像得到的地壳断裂带图像和地面地质图上的断裂名称和位置不可能完全相同。例如,本文图2~5定义的地壳断裂带华北克拉通北缘古俯冲带断裂和华北克拉通北缘断裂,根据地球物理场可以看到它们在地壳深部属于没有完全连接的两条断裂,而在地面上,由于基岩露头本身就不连续,大致地认为它们属于同一条断裂,所以许多地质图上称为华北北缘断裂。地球物理调查的目的,就是要把我们对于地球的认知精确化立体化,而不是仅仅维持表面上信息有限的认识。本文图2~5定义的地壳断裂带是与地面断裂有位置关联的地壳深部断裂,其中地磁场图上属于深度在5 km以下结晶基底层。图2定义地壳断裂带还包括它们在中、下地壳的位置的图象,见下面的讨论。通过综合地球物理资料的分析研究,来标定内蒙古高原岩石圈的三维立体构造,正是本项目研究的目的。

为了提取更多信息,可以应用基于谱矩的方法对于磁源体深度进行反演(杨文采等,2015a,2015b;付丽华和杨文采,2018),求得的结果见图3。由位场理论可知,用4阶谱矩计算航磁异常的曲率,而曲率越大对应该处磁源体的埋深值越小。谱矩方法可以对数据对应的几何形貌做较为细致的描述。用各阶谱矩及统计不变量等具体的参数表征表面的几何形态。算术平均的顶点曲率是一种基于四阶谱矩的统计不变量,埋深不同的场源所引起的磁异常尺度不同,从曲率的角度来理解即为磁异常曲面的弯曲程度不同。因此,可应用算术平均顶点曲率提取磁异常的几何信息,并将所提取的信息用于场源深度的反演。计算后将研究地区磁源体埋深值的分为大、中、小三类:0~5 km为结晶基底顶部,5~15 km为上地壳,15~30 km对应中地壳。基于谱矩的磁源体深度反演方法得到的结果并非是点状不连续的标记,而是连续的区片,因为区域磁场由大量异常组成,相互连接,计算的关键之一是避免相连异常干扰,而谱矩方法用曲率计算磁源体深度,反演出的深度结果受相连异常干扰较少。

从内蒙古高原磁源深度(图3)可见,根据异常走向、深度和分带伸展关系,发现的区域断裂分布与图2基本一致。它们之间的构造单元可分为5个,从北向南分别为:Ⅰ南阿穆尔-兴安地体;Ⅱ锡林浩特地体;Ⅲ索伦山-西拉木伦河缝合带,指包括断裂变形和岩浆活动在内的地壳变形带;Ⅳ华北克拉通北缘俯冲带,指包括大陆俯冲形成的断裂在内的地

壳变形带;Ⅴ华北克拉通地体。此地壳构造的划分是否正确,还需要参考其他地球物理资料所提供的信息。

## 2 从地面重力数据看地壳构造

内蒙古地区的地面重力数据来自原地质部1990年代完成的区域重力调查项目中内蒙古多个测区1:25万的测量,后来经过内蒙古地质调查院的标定和同化处理,经纬度范围分别为:东经 $106^{\circ}\sim 118^{\circ}$ ,北纬 $38^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,数据内插到网格 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 。首先将自由空气重力数据进行改正,获得的布格重力异常图示见图4a。与研究区航磁异常一样,布格重力异常图呈现明显的分带现象,场的梯度跃变带与区域大断裂带位置对应。根据内蒙古高原磁源深度图中异常走向、深度和分带伸展关系(图4a)可见区域断裂分布与图3所示基本一致,五个构造单元的划分也基本相同(图3、4a)。构造单元Ⅰ的上阿穆尔-兴安地体为中等密度;锡林浩特地体(Ⅱ)总体低密度;索伦山-西拉木伦河缝合带(Ⅲ)为中等密度;华北克拉通(Ⅳ)北缘俯冲带为高密度;华北克拉通地体(Ⅴ)内的河套盆地为低密度(图4a)。

根据2014年完成的张家口-二连深反射地震剖面调查(Zhang Shihong et al., 2014)推断地壳剖面(图4b)。由此剖面可见,锡林浩特地体(Ⅱ)的北面受南阿穆尔-兴安地体(Ⅰ)的碰撞,南面为华北克拉通陆块(Ⅴ)俯冲,俯冲的角度比较平缓。华北陆块俯冲带分索伦山-西拉木伦河缝合带(Ⅲ)和华北克拉通北缘俯冲带(Ⅳ)两部分,地面宽度都达到70 km以上。索伦山-西拉木伦缝合带(Ⅲ)的地壳变形十分剧烈,地壳磁性和密度变化大。华北克拉通北缘俯冲带(Ⅳ)的俯冲角度很小,仅仅上地壳变形剧烈。由此可知,陆-岛碰撞后大陆拼合期也发生大陆的局部俯冲,造成一定的地壳变形带,并伴随强烈的岩浆活动。但是,这种大陆块俯冲没有形成类似于喜马拉雅那样的宏伟山脉,因为大陆拼合的力度和运动速度都远小于大陆碰撞力度和运动速度。

地面重力数据反映从上地壳到莫霍面全部地壳构造,可以进行多尺度分解,以提取不同深度地层密度扰动的信息。场源埋藏深度越大,密度扰动源和地面重力异常场的水平尺度就越大。因此,进行地面重力异常场小波多尺度分解以后,小尺度的小波细节反映埋藏深度小的场源分布,而大尺度的小波细节反映埋藏深度大的场源分布(杨文采等,2001, 2012, 2015, 2017;侯遵泽等,2012)。由大尺度的高

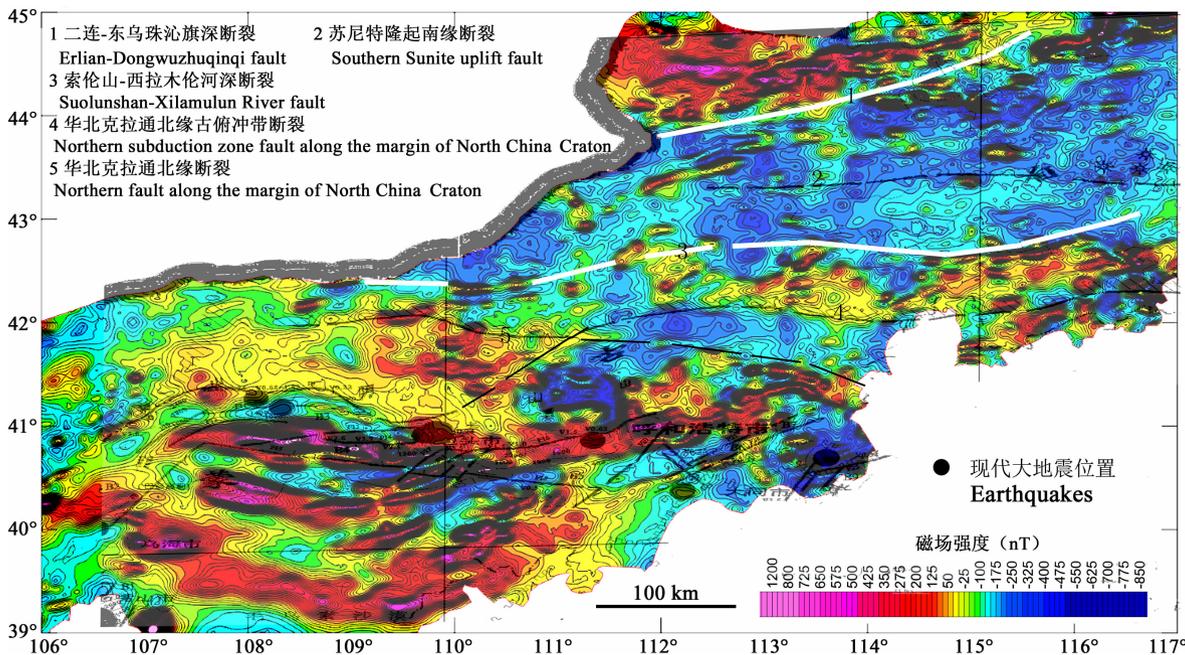


图 2 内蒙古高原地区航空磁力场化极平面图

Fig. 2 Aeromagnetic map of the Inner Mongolia Plateau

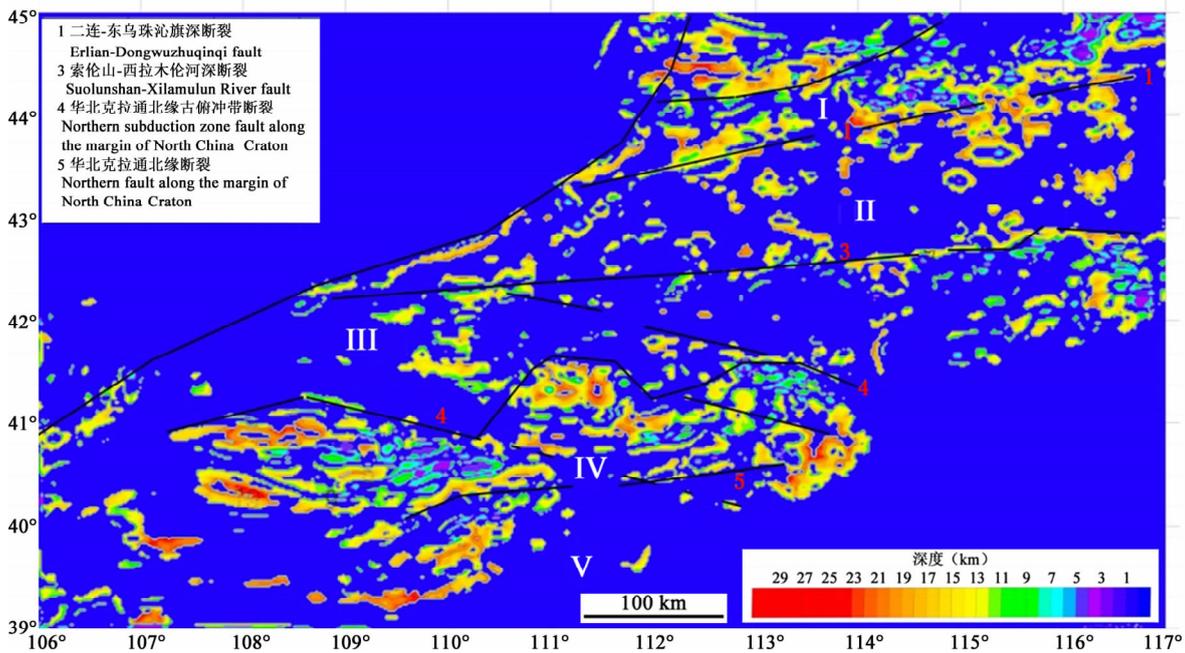


图 3 内蒙古高原磁源深度平面图及其内部断裂分布

Fig. 3 The depth map of magnetic sources from aeromagnetic map of the Inner Mongolia Plateau, showing the distribution of major faults

构造单元: I—上阿穆尔地体; II—锡林浩特地体; III—索伦山-西拉木伦河缝合带; IV—华北克拉通北缘俯冲带; V—华北克拉通地体  
 The tectonic units: I—upper Amur terrain; II—Xilinhot terrain; III—Suolunshan-Xilamulunhe suture; IV—northern subduction zone along the northern margin of the North China Craton; V—North China Craton

阶小波细节可以看到中下地壳的密度扰动,反映了中下地壳的构造。图 5 为内蒙古高原地区布格重力场高阶小波细节平面图,包括重力场 4 阶小波细节,

对应场源深度 9.6 km; 和对应中地壳场源的 5 阶小波细节及对应下地壳场源的 6 阶小波细节。由此可见,在上地壳五个构造单元都还存在,在中地壳存

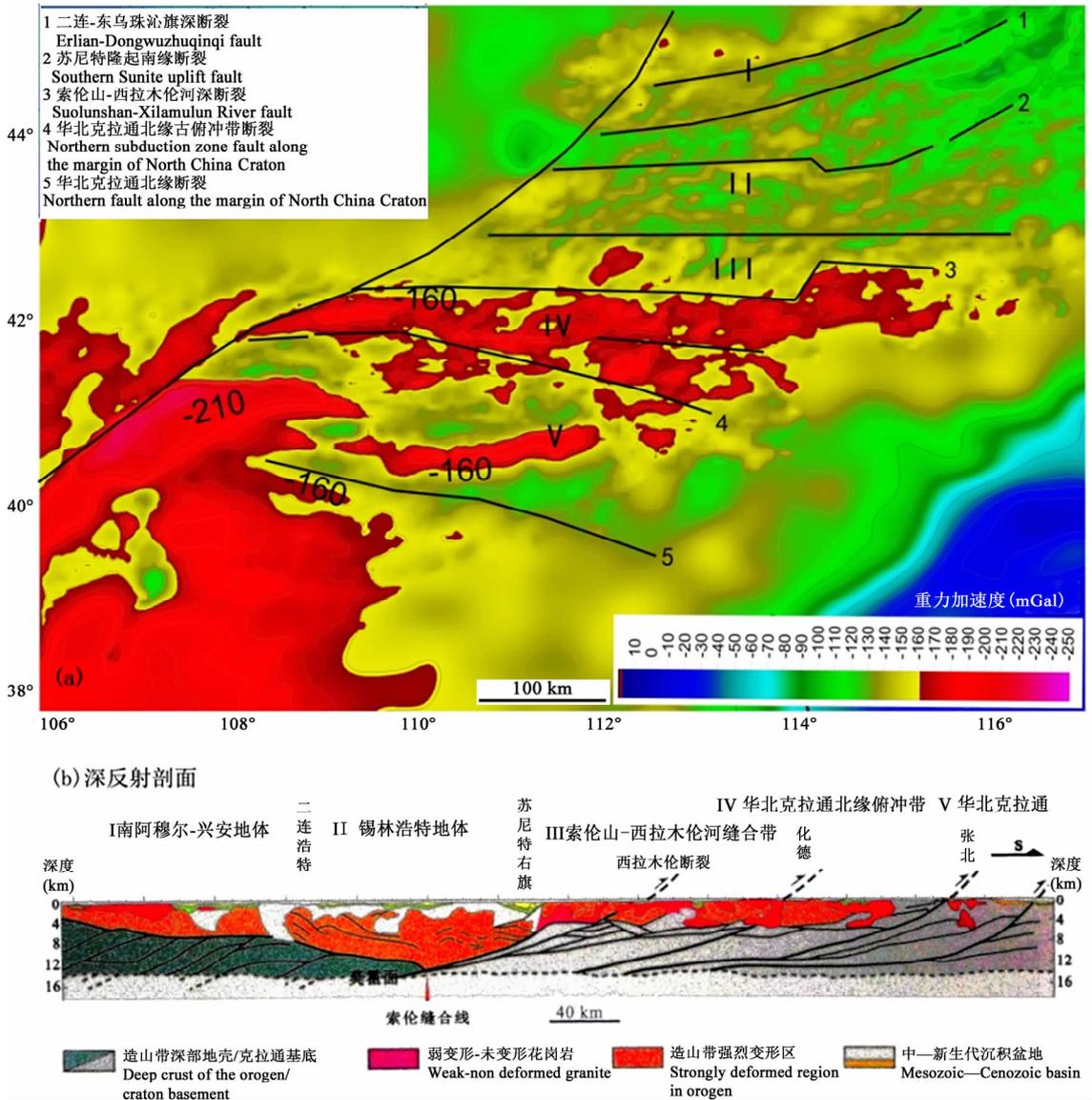


图 4 内蒙古高原地区布格重力场平面图及其对应构造单元划分(a)以及张家口-二连深反射地震剖面推断的地壳剖面(b)

Fig. 4 Bouguer gravity map of the Inner Mongolia Plateau (a) and the crustal structures explained by the Zhangjiakou-Erlian deep reflection profile (b)

构造单元: I—上阿穆尔地体; II—锡林浩特地体; III—索伦山-西拉木伦河缝合带; IV—华北克拉通北缘俯冲带; V—华北克拉通地体  
The tectonic units: I—upper Amur terrain; II—Xilinhot terrain; III—Suolunshan-Xilamulunhe suture; IV—northern subduction zone along the northern margin of the North China Craton; V—North China Craton

在三个构造单元,锡林浩特地体和索伦山-西拉木伦河缝合带融为一体。在下地壳华北克拉通北缘俯冲带和 华北克拉通地体也趋向于融为一体。注意现今地壳构造从上到下的变化,不完全反映二叠纪大陆拼合的地壳构造,因为地壳向下温度增加,物质黏度减小,蠕动量加大。因此,老的地质作用痕迹在下地壳不容易长久保存(杨文采,2021)。

### 3 从大地电磁数据看岩石圈构造

内蒙古地区的大地电磁数据来自 2017 年内蒙

古自治区地质勘查基金调查项目,由浙江大学地球科学学院开展大地电磁测量,经纬度范围分别为:东经 106°~118°,北纬 38°~43°,数据采集为网格经纬度 1°×1°,局部加密。每一个测站用 LEMI 长周期大地电磁仪进行观测,观测时间为 7~30 d。取得大地电磁场五分量数据。在经过数据处理(Egbert et al., 1986)后,获得了 7 s 到 10000 s 频段的长周期阻抗张量和倾子资料,部分测点最长周期达到 40000 s。将该长周期数据与 SinoProbe 华北测网进行联合三维反演(Egbert et al., 2012),获得的三

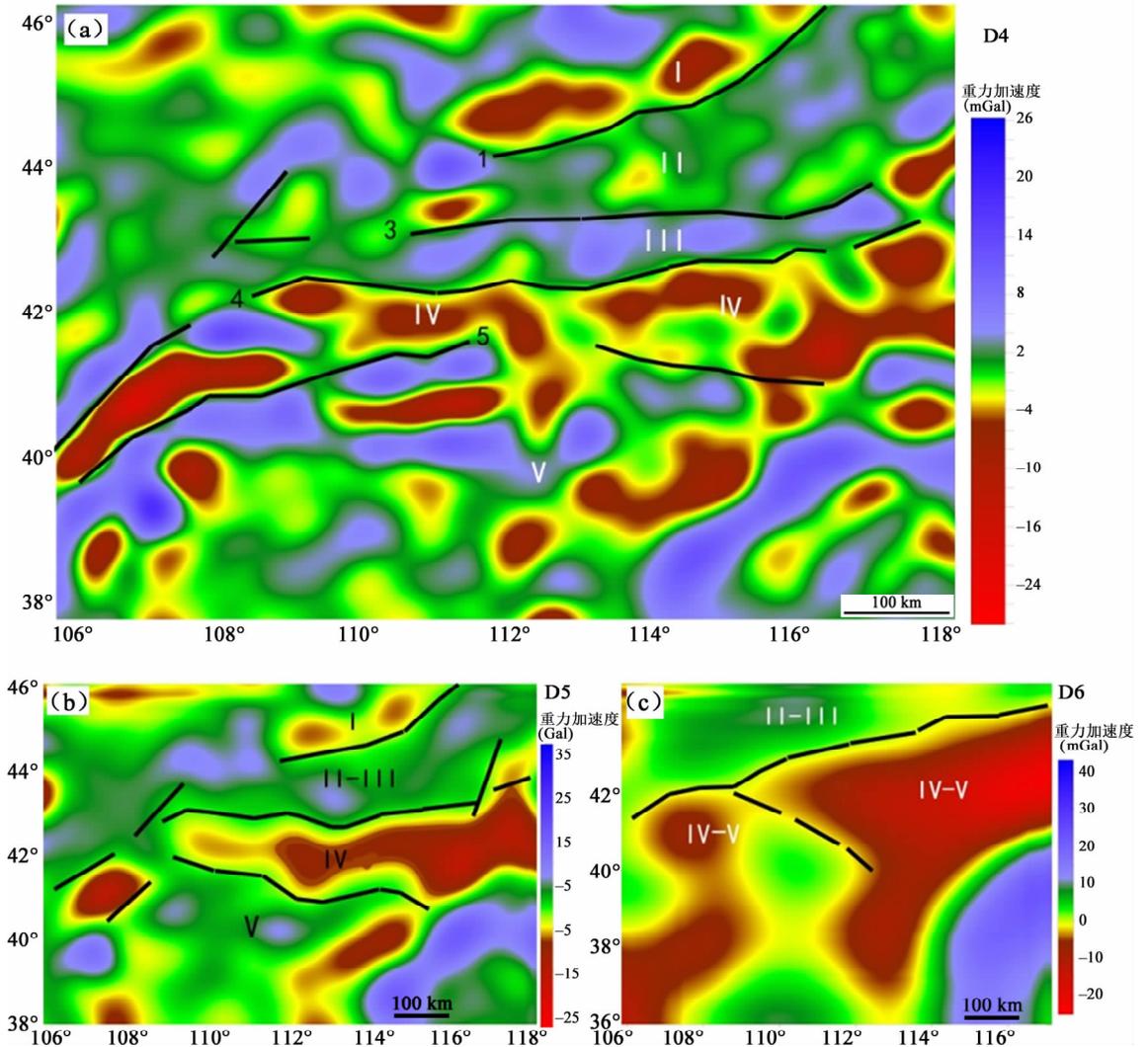


图5 内蒙古高原地区布格重力场高阶小波细节平面图

Fig. 5 High orders of wavelet details of Bouguer gravity anomalies of the Inner Mongolia Plateau

(a)一重力场4阶小波细节,对应场源深度9.6 km;(b)一5阶小波细节,对应场源深度22 km;

和(c)一6阶小波细节对应场源深度42 km;单元与断裂名称同图3和图4

(a)—The fourth order with depth of 9.6 km; (b)—the fifth order with depth of 22 km; (c)—the sixth order with depth of 42 km;

the figure legends of tectonic units and faults are the same as Figs. 3 and 4

维电阻率异常平面图集见图6,平面图对应的深度分别为10 km、28 km、37 km、63 km、94 km和143 km。从对应上中下地壳的10 km、28 km、37 km深度异常图可以看出,与研究区布格重力高阶小波细节呈现的分带现象相似,内蒙古高原的地壳电阻率异常也存在从北向南的构造区分带。电阻率异常走向和梯度跃变带反映的区域大断裂带位置与图3和图4对应一致,五个构造单元的划分也基本相同。可见上述关于研究区的地壳构造认知,重、磁、电、震四大地球物理探测的结果是一致的。

从63 km、94 km和143 km深度的三维电阻率异常平面图(图6右)可以看到内蒙古高原的岩石

圈地幔结构特征。深度63 km的平面图对应岩石圈地幔顶部。根据异常走向、深度和分带可知,索伦山-西拉木伦河断裂带(Ⅲ)、华北克拉通古俯冲断裂带(Ⅳ)和华北克拉通北缘断裂三条断裂带(Ⅴ)都有电阻率梯度带显示,说明它们是岩石圈断裂。从深反射地震剖面(图4b)可见,在莫霍面处二连-东乌旗断裂(Ⅰ)和锡林浩特地体内部断裂已经与索伦山-西拉木伦河断裂合并在一起。深度94 km和143 km的平面图分别对应岩石圈地幔中部与底部,可见在古俯冲带和古俯冲断裂带两侧地幔电阻率比较低,表明这些位置岩石依然比较破碎、含水比较多。

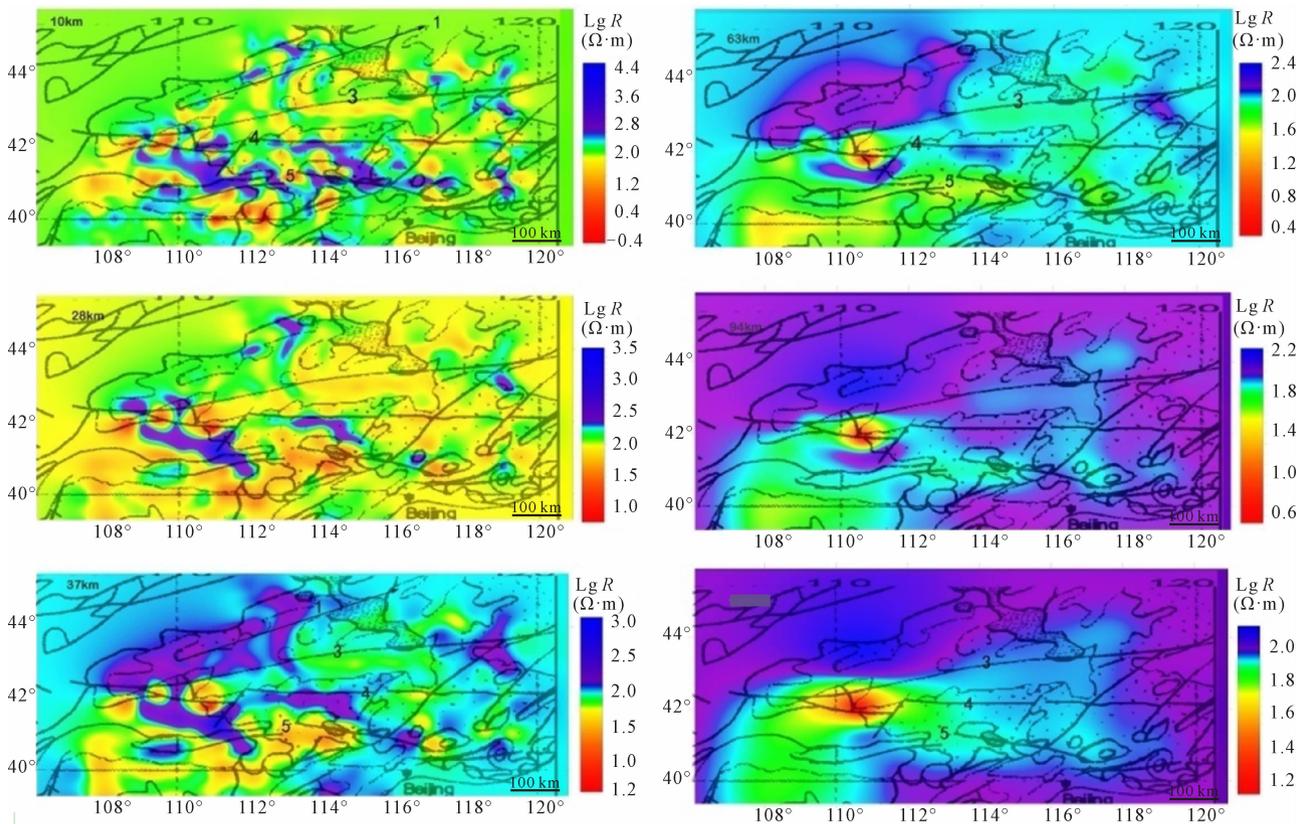


图 6 内蒙古高原地区大地电磁法电阻率三维成像图集

Fig. 6 MT electrical resistivity maps of the Inner Mongolia Plateau

左侧从上到下深度分别为 10 km、28 km 和 37 km；右侧从上到下深度分别为 63 km、94 km 和 143 km；R—电阻率；断裂名称同图 3 和图 4  
 Left side, from top to bottom, shows depths of 10 km and 28 km, 37 km; right side, from top to bottom, shows depths of 63 km, 94 km and 143 km; R—resistivity; the figure legends of faults are the same as Figs. 3 and 4

在深度 94 km 和 143 km 的平面图上,低地幔电阻率异常的形象好似一个“鸭头”,它的眼睛位于白云鄂博,电阻率只有  $10 \Omega \cdot m$ (图 6)。这只鲜红色的“眼睛”从岩石圈地幔底部到上地幔一直都存在,面积慢慢变小。这种地幔电阻率异常模式最可能反映软流圈流体的向上穿刺,在大陆内部极其少见。软流圈流体的穿刺在大洋中反映洋岛链与热点;由于大陆岩石圈比大洋厚得多,大陆上的软流圈流体的穿刺很少发生。白云鄂博位于二连-东乌旗地壳断裂、索伦山-西拉木伦河岩石圈断裂和河北克拉通俯冲带岩石圈断裂的交会处,出现软流圈流体的穿刺不是偶然的。但是,白云鄂博的大地热流不高,不是大陆上的热点。

### 4 讨论与结论

在板块大地构造学之后兴起的地球动力学研究,发展和创新了关于地壳与地幔认知的新的学术思想(Anderson, 1989; James, 1989)。与板块大地构造学不同的是,地球动力学研究力求从三维空间

的角度看地下构造。地球动力学研究从地球内部看地球,其理论根据是 1975 年以后全球地壳和地幔调查取得的大数据。在 2012 年已经完成了全球  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  布格重力和地磁数据库(Nikolaos et al., 2012; Maus et al., 2009)和  $1^\circ \times 1^\circ$  全球地震波速度成像图集(Laske et al., 2013)。这些数据反映了显生宙以来的地幔物质运动造成的刻痕。地球物理数据反映的地幔物质属性,有精确的深度和空间尺度坐标,就可以提供精确的地下物质运动的信息。

本文通过综合地球物理资料,对上、中、下地壳和岩石圈地幔属性分别分析研究,来阐述内蒙古高原岩石圈的物质运动,取得了以下认识:

(1)地体拼合属于岩石圈挤压力较小而作用期较长的造陆作用,以内蒙古中部地区为代表。此区域现今包括南阿穆尔-兴安地体西南部和锡林浩特两个元古宙地体,以及形成于太古宙的华北克拉通地体。索伦山-西拉木伦河断裂是锡林浩特和河北克拉通地体的缝合带。本文通过综合地球物理资料的分析研究,标定了它们的位置。

(2)发生在二叠纪的锡林浩特和华北克拉通两个地体的碰撞拼合,造成古亚洲洋南支的封闭,同时也在两个地体之间,形成了索伦山-西拉木伦缝合带和华北克拉通北缘俯冲带。古亚洲洋封闭后,华北克拉通地体继续向锡林浩特地体下方陆-岛俯冲,形成了宽度在60~120 km的华北克拉通北缘俯冲带。此俯冲带地层向北倾斜,上地壳变形严重,岩石圈地幔破裂充水。

(3)锡林浩特地体在石炭纪处于南阿穆尔-兴安地体南方古亚洲洋北支俯冲的岛弧带位置,在二叠纪和华北拼合时又处于华北克拉通北方、古亚洲洋南支俯冲的岛弧带位置,幔源岩浆侵入频繁。在中生代拼合后锡林浩特地壳转变为拉张阶段,幔源岩浆侵入作用有增无减。由于幔源岩浆侵入作用时间长,岩浆化学分异会更加彻底,锡林浩特地体及其周边地区的成矿作用有良好的前景。

**致谢:**感谢内蒙古自治区地质勘查基金对于本项目的赞助,同时感谢内蒙古自治区地质调查院院长宋华和总工程师王守光等领导对项目立项、实施全过程的大力支持和对于研究组成员的关心。

## References

- Anderson D L. 1989. Theory of the Earth. Boston: Blackwell Scientific.
- Cheng Yuqi. 1994. Introduction to Regional Geology in China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Egbert G, Booker J. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 87(1): 173~194.
- Egbert G, Kelbert A. 2012. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophysical Journal International, 189: 251~267.
- Fu Lihua, Yang Wencai. 2018. Depth evaluation of magnetic sources by spectral moment analysis. Chinese Journal of Geophysics, 61(7): 3044~3054 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zunze, Yang Wencai. 2011. Multi-scale inversion of density structure from gravity anomalies in Tarim basin. Science China Earth Sciences, 54(3): 399~409.
- Hou Zunze, Yang Wencai. 2012. Wavelet Multi-Analysis Method and Applications (in Chinese with English abstract). Beijing: Science Press (in Chinese).
- Gary M, Tapan M, Jack D. 2009. Rock Physics Handbook. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jahn B M. 2004. The central Asia orogenic belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. In: Malpas J et al, eds. Aspects of the tectonic evolution of China. Geological Society of London, special Publication, 226: 73~100.
- James D E. 1989. The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. New York: Van Nostrand Reinhold. Jolivet L, Hataf H C. 2001. Geodynamics. Lisse: A. A. Balkema.
- Laske G, Masters G, Ma Z, et al. 2013. CRUST1.0: an updated global model of Earth's crust. EGU General Assembly Conference.
- Ma Lifang, Ding Xiaozhong, Ju Yuanjing. 2006. Geological Atlas of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, et al. 2009. EMAG2: a 2-arc min resolution Earth Magnetic anomaly grid compiled from

- satellite, airborne, and marine magnetic measurements. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10: Q08005.
- Nikolaos K Pavlis, Simon A H, Steve C K, John K F. 2012. The development and evaluation of the Earth gravitational model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117, B4: 1~33.
- Su Meixia, Yang Bo, Wu Yanjun, Yan Ping, Meng Xiaoling. 2020. Deep mineralization processes in the central-south Great Hinggan magmatic belt. Geological Review, 66(5): 1321~1333 (in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng. 2004. Tectonic Framework of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Warren J N. 2009. Metallogenesis and tectonics of Northeast Asia. USGS professional paper 1766, Data Announcement 81-MGG-04.
- Yang Wencai. 2012. Theoretical Framework of Reflection Seismology. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Yang Wencai. 2021. Correlation between density and seismic velocity anomalies with different tectonic events in Chinese Continent. Acta Geologica Sinica, 95(1): 227~237 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Shi ziqian, Hou Zunze, Cheng Zhenyan. 2001. Describe wavelet transform and multi-scale decomposition of gravity anomalies. Chinese Journal of Geophysics, 44(4): 534~541.
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2014a. Continental collision process revealed by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (I). Geological Review, 60(2): 237~259 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2014b. Continental collision process revealed by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (II). Geological Review, 60(3): 486~502 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Yu Changqing, Sun Yanyun, Hou Zunze. 2015a. The multi-scale scratch analysis method for quantitative interpretation of regional gravity field. Chinese Journal of Geophysics, 58(1): 41~53.
- Yang Wencai, Hou Zunze, Yu Changqing. 2015b. The three dimensional density structures of Qinghai-Tibet Plateau and crustal mass movement. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4223~4234.
- Yang Wencai, Chen Zhaoxi, Hou Zunze. 2016. Three dimensional crustal density structure of Central Asia and its geological implications. Acta Geophysica, 64: 1257~1274.
- Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze. 2017. Crustal density structures beneath orogenic belts of Chinese continent. Geological Review, 62(3): 539~548 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shihong, Gao Rui, Li Haiyan, Hou Hesheng, Wu Huaichun, Li Qiusheng, Yang Ke, Li Chao, Li Wenhui, Zhang Jishen. 2014. Crustal structures revealed from a deep seismic reflection profile across the Solonker suture zone of the Central Asian Orogenic Belt, northern China: an integrated interpretation. Tectonophysics, 612: 26~39.

## 参考文献

- 程裕祺. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社.
- 付丽华, 杨文采. 2018. 谱矩方法在磁源体深度反演中的应用研究. 地球物理学报, 61(7): 3044~3054.
- 国土资源航空物探遥感中心. 2005. 中国及毗邻海域磁力异常图(1:500万). 北京: 地质出版社.
- 侯遵泽, 杨文采. 2011. 塔里木盆地多尺度重力场反演与密度结构. 中国科学(D辑), 41(1): 29~39.
- 侯遵泽, 杨文采. 2012. 小波多尺度分析应用. 北京: 科学出版社.
- 马丽芳, 丁孝忠, 尉远景. 2006. 中国地质图集. 北京: 地质出版社.
- 苏美霞, 杨波, 吴艳君, 颜萍, 孟晓玲. 2020. 大兴安岭中南段构造岩浆岩带深部地质成矿作用. 地质论评, 66(3): 1321~1334.
- 万天丰. 2004. 中国大地构造学纲要. 北京: 地质出版社.

杨文采. 2012. 反射地质学理论纲要. 北京:石油工业出版社.  
 杨文采. 2021. 中国大陆密度和地震波速扰动异常的年龄属性研究. 地质学报, 95(1): 227~237.  
 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 程振炎. 2011. 离散小波变换与重力异常多重分解. 地球物理学报, 44: 534~541.  
 杨文采, 于常青. 2014a. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞作用(上). 地质论评, 60(2): 237~259.  
 杨文采, 于常青. 2014b. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞作用(下).

地质论评, 60(3): 486~502.  
 杨文采, 孙艳云, 侯遵泽, 于常青. 2015a. 用于区域重力场定量解释的多尺度刻痕分析方法. 地球物理学报, 58(2): 520~531.  
 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 2015b. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动. 地球物理学报, 58(11): 4223~4234.  
 杨文采, 瞿辰, 侯遵泽. 2017. 中国大陆造山带地壳密度结构特征. 地质论评, 63(3): 539~548.

## Geophysical study on lithospheric structures of Inner Mongolia Plateau

YANG Wencai<sup>1)</sup>, SU Meixia<sup>2)</sup>, YANG Bo<sup>\*1)</sup>, WU Yanjun<sup>2)</sup>, WANG Qinyan<sup>1)</sup>, GUO Guangfei<sup>2)</sup>,  
 LIU Shuyu<sup>1)</sup>, MENG Xiaoling<sup>2)</sup>, CHEN Mengtao<sup>1)</sup>, SHI Yuan<sup>1)</sup>, PENG Zhong<sup>1)</sup>

1) School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2) Inner Mongolia Geological Survey Institute, Huhehot, Inner Mongolia 010020, China

\* Corresponding author: bo.yang@zju.edu.cn

### Abstract

Based on newly collected geophysical data, this paper analysis upper, middle and lower crust structures, viewing mass movement processes in Inner Mongolia. The terrain amalgamation belongs to a lower-pressure and longer period of geological process, with the central region of Inner Mongolia as the typical representative. We derive the lithospheric structures in Inner Mongolia Plateau by the integrated analysis of comprehensive geophysical data. This area now includes two Proterozoic terrains, the southwest Amur-Xing'an terrain and the Xilinhot terrain, and the ancient North China Craton. The Sorren Mountain-Silamullen River fault is a suture belt between the Xilinhot terrain and the North China Craton. The collision of the two occurred in the Permian, resulted in the closure of the southern branches of the ancient Asian ocean, and formed the Suolun Mountain-Silamullen suture belt and the north-edge subduction zone of the North-China Craton. After the closure of the ancient Asian ocean, the North China Craton continued to subduct towards the land-island below the Xilinhot terrain, forming a north edge subduction zone of North China Kraton with a width of 60~120 km. The subduction zone formation tilts northwards, causing that the upper crust deformed severely, and the lithosphere mantle ruptured and filled the water. In the Carboniferous period, Xilinhot terrain was located in the south of Amur-Xing'an terrain in the southern ancient Asian ocean, as a subduction belt linking to island arcs. In the Permian, the Xilinhot terrain was located in the northern subduction belt of the North China Craton, also linking to island arcs, with frequent magma invasions. After the Mesozoic, the crust of Xilinhot terrain termed to extension, mantle-source magma invasions acted strongly, resulting in a good mineralization in the Xilinhot terrain and its surrounding areas.

**Key words:** Paleo-Asia ocean; continent-island collision; terrain amalgamation; Inner Mongolia; lithospheric structures