

doi:10.3799/dqkx.2016.099

准噶尔盆地及邻区地壳磁性特征及其构造意义

孙石达^{1,2}, 陈超^{1,2*}, 杜劲松^{1,2}, 许顺芳^{1,2}, 胡正旺^{1,2}, 王秋革^{1,2}

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 准噶尔地块可分为东、西准噶尔构造区和准噶尔盆地。自古生代以来准噶尔盆地及其周边大规模的火山活动和复杂的构造演化、以及有关准噶尔盆地基底及其与周边的构造关系及其演化,一直存在争议。利用 EMAG2 岩石圈磁异常模型,采用三维反演技术,对准噶尔及其周边地区的地壳磁化率进行成像,得到了 0~60 km 深度范围之内的磁性结构。反演结果显示:准噶尔盆地腹部地壳磁性结构相对完整;西准噶尔地壳具有与洋壳俯冲相关岛弧环境的磁性结构;东准噶尔和吐哈盆地磁性层较厚且连续,具有古陆基底特征。此外,地壳磁化率异常展示了区域断裂构造及其深部延伸特征,同时显示在覆盖区可能存在隐伏深大断裂带。对该地区岩石圈磁异常成因的定量解释,为深入剖析准噶尔地区岩石圈构造及其与周边构造单元之间的关系提供了有益的资料和参考。

关键词: 岩石圈磁异常; 准噶尔; 地壳磁性结构; 三维反演; 大地构造; 构造地质学。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2016)07-1216-09

收稿日期: 2015-10-30

Magnetic Characteristics and Tectonic Implications of Crust in Junggar Basin and Its Surroundings

Sun Shida^{1,2}, Chen Chao^{1,2*}, Du Jinsong^{1,2}, Xu Shunfang^{1,2}, Hu Zhengwang^{1,2}, Wang Qiuge^{1,2}

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Key Laboratory of Subsurface Multi-Scale Imaging, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Junggar block can be divided into east, west Junggar tectonic zones and Junggar basin. Since the Paleozoic, large scale volcanic activity and complex tectonic evolution occurred in the Junggar basin and its surroundings. There have long been controversies on the basement of the Junggar basin, its structure relationship with its surroundings and its evolution. In this paper, we use the EMAG2 lithospheric magnetic anomaly model, together with modern 3D inversion technique, to image the crustal magnetic susceptibility of the Junggar basin and its surroundings, and to obtain the magnetic structure of the 0~60 km depth range. The inversion results show that the magnetic structure of the crust in central Junggar basin is relatively complete, the west Junggar crust has a magnetic structure associated with subduction of oceanic crust arc environment, and both the east Junggar and the Turpan basin have thick and continuous magnetic layer with paleo-continental basement features. Moreover, the crustal magnetic susceptibility anomaly shows the regional fault structure and its deep extension features, and existence of concealed deep fault zone in the covered area as well. The quantitative explanation of the origin of the magnetic anomaly in this area provided in this paper can be useful information and reference for the further analysis of the relationship between the lithosphere structure and the surrounding tectonic units in Junggar area.

Key words: lithospheric magnetic anomaly; Junggar; crustal magnetic structure; 3D inversion; tectonic structure; tectonic geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41574070); 中国地质调查局项目(No.1212011220245); 湖北省自然科学基金面上资助项目(No. 2015CFB361); 中国博士后科学基金面上资助项目(No.2015M572217)。

作者简介: 孙石达(1990—),男,博士研究生,主要从事重磁数据处理、反演与解释方面研究.E-mail: shidasun.cug@gmail.com

* 通讯作者: 陈超, E-mail: chenchoa@cug.edu.cn

引用格式: 孙石达, 陈超, 杜劲松, 等, 2016. 准噶尔盆地及邻区地壳磁性特征及其构造意义. 地球科学, 41(7):1216~1224.

0 引言

准噶尔地块位于中亚造山带中部,为西伯利亚、哈萨克斯坦板块和天山所界限。准噶尔地块与哈萨克斯坦板块相接、夹持于西伯利亚板块和塔里木板块之间,许多学者称其为哈萨克斯坦—准噶尔板块(成守德和王元龙,1998)。依据构造特征,传统上学者们将准噶尔地块划分为东、西准噶尔构造区和准噶尔盆地3个单元。大量的研究表明,古生代以来准噶尔盆地及其周边构造单元经历了复杂而多样的演化历程。有关准噶尔盆地基底及其与周边的构造关系及其演化,学者们一直存在着不同的观点。从新元古代开始,该构造区域经历了古陆块碰撞聚合(如李春昱等,1982;肖序常等,1992)或古大陆边缘岛弧碰撞(Sengör *et al.*, 1993),后经古生代、中生代大规模的火山活动和构造演化的改造,形成现今的构造格局。有关准噶尔盆地基底属性问题历来有不同的认识,例如江远达(1984)、Carroll *et al.*(1990, 1995)认为准噶尔盆地的基底主要由洋壳组成;而吴庆福(1986)、黄汲清等(1990)认为由残余古老陆壳组成;另一些学者则认为是由含有陆壳碎块的洋壳组成(肖序常等,1992;张弛和黄萱,1992;李锦铁和肖序常,1999)。

近年来,随着该地区岩石学、地球化学和地球物理研究工作的开展,学者们为认识该地区的深部结构和揭示该构造域的构造演化问题提供了许多新证据。特别是卫星对地观测技术的发展使全球性重力和磁测资料的精度与分辨率日益提高,这项技术已成为发现与解决地球科学问题的重要手段。本文利用最近发布的岩石圈磁异常数据,对准噶尔盆地及其周边区域的岩石圈磁异常和重力异常特征开展研究,分析该地区岩石圈磁性结构与大地构造之间的关系,旨在为深入剖析这一结构复杂区域的深部结构和构造演化提供参考。

1 构造背景及其岩石圈重、磁异常

大地构造上,新疆北部地区地壳的形成与演化,主要经历了元古宙古陆形成—裂解与聚合、晚元古—古生代洋盆的打开与关闭及相关的大陆裂解与聚合、中生代亚洲大陆边缘演化、新生代与印度—亚洲大陆碰撞有关的陆内造山等构造阶段(肖序常等,1992;成守德和王元仁,1998)。如图1所示,准噶尔盆地位于新

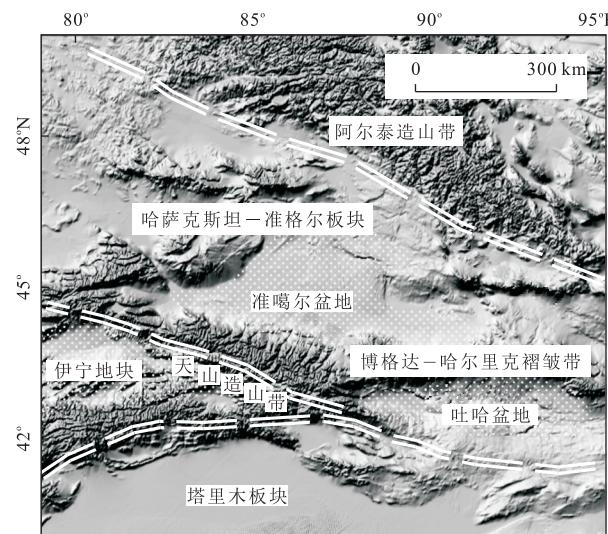


图 1 准噶尔盆地及邻区的大地构造示意

Fig.1 Sketch map of tectonics in the Junggar basin and its surroundings

根据肖序常等(1992)修绘;底图的 DEM 数据源自 ETOPO1.0 (www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html)

疆北部构造域的中心,周边与阿尔泰造山带、西准噶尔构造带、东准噶尔构造带、西天山造山带及博格达—哈尔里克褶皱带相接。其中,阿尔泰造山带以南的额尔齐斯构造带贯穿盆地北侧;东准噶尔区域内近东西向展布的卡拉麦里构造带与额尔齐斯构造带相邻,向西伸入准噶尔盆地腹部;博格达—哈尔里克褶皱带将东准噶尔与吐哈盆地相隔离。

研究区布格重力异常可以通过最新发布的 EIGEN-6C4 模型(Shakopee *et al.*, 2014)解算并且经地形校正后得到。图 2 展示了准格尔盆地及周边区域的布格重力异常。由图 2 可见,布格重力异常在哈萨克斯坦—准噶尔区域表现为相对重力高,由北西向南东伸展并逐步减弱,其中准噶尔盆地区域异常低缓且相对简单,表明这一区域岩石圈整体上具有相对高密度;西北部阿勒泰造山带前沿有一个相对重力低异常条带区,沿 NW-SE 向展布;北天山(西天山北段)东段表现为高值背景上的相对重力低,与伊宁地块南侧的南天山重力低异常带相对应;吐哈盆地北部为相对重力低条带,分割了南北两侧的重力高值带;吐哈盆地南部的相对重力高与塔里木盆地东北缘的东天山—北山造山带重力高异常带相连接;塔里木盆地北部区域则以低缓重力异常为特征。

岩石圈磁异常主要反映岩石圈磁性物质的空间分布。准噶尔盆地及周边区域岩石圈磁异常(ΔT)数据是从 EMAG2(Maus, 2009)网格数据模型中提取

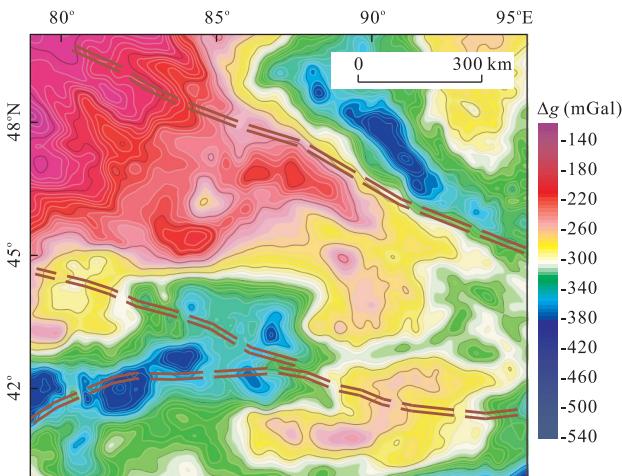


图 2 准噶尔盆地及邻区布格重力异常值 Δg
Fig.2 Bouguer gravity anomaly in the study area
数据:对 EIGEN-6C4 模型解算并进行地形校正

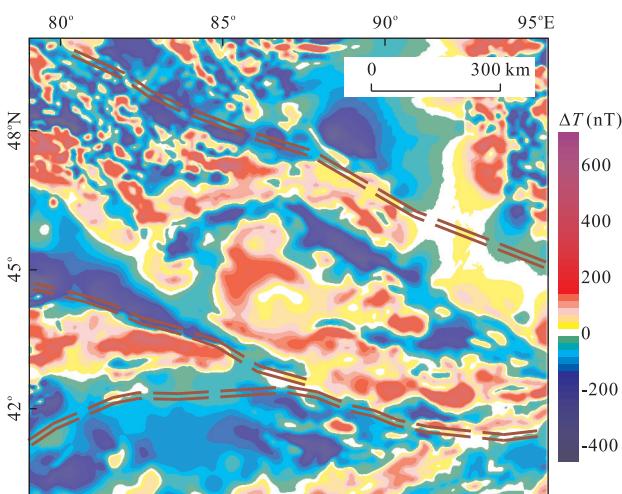


图 3 准噶尔盆地及邻区 ΔT 磁异常值
Fig.3 ΔT magnetic anomaly in the study region area
数据:EMAG2 网格模型数据

而来,数据分辨率为 2 弧分,如图 3 所示。准噶尔盆地区域岩石圈磁异常整体呈 NW-SE 向展布,盆地北部以 NW-SE 向条带异常为特征。其中,额尔齐斯构造带上为正磁异常,相邻的乌伦古构造带上则为宽缓的负磁异常;盆地腹部覆盖区主要分布着较为平缓的正磁异常。西准噶尔及盆地西北侧哈萨克斯坦板块区域内磁异常相对凌乱,总体上表现为 NW-SE 向正、负相间的磁异常,与盆地内异常特征形成鲜明对比。此外,伊宁地块北部和北缘的依连哈比尔尕山表现为高值正、负条带异常,北天山东段—博格达山一带与吐哈盆地南部的正异常条带反映了不同构造背景下岩石圈磁性物质的聚集特征。

2 主要构造区岩石圈磁异常成因分析

岩石圈磁异常主要由卫星高空磁测数据和海磁以及部分航磁数据联合解算而来,它主要反映岩石圈上部(居里温度面以上)中、大尺度磁性体的分布,而地壳表层小规模磁性体的磁异常在其中并不占主导。因此,对于岩石圈磁异常的成因分析不能完全等同于地面或航空磁异常成因解释,例如,大片负异常区域并非正异常的“附属”(如一些海山、洋岭区域常为负磁异常)。

前人的研究表明,准噶尔盆地及其周边区域广泛分布着不同时期的火山岩(韩宝福,1991;肖序常等,1992;李江海等,2015),而古生代—中生代火山活动最为强烈。该区域的岩石圈磁异常主要与大规模幔源基性—超基性火山岩分布以及古陆变质岩(磁性)基底有关。笔者根据该区域布格重力异常垂直一次导数(图 4)和磁异常特征,绘制了区内主要的异常特征线,描绘可能的构造分界线或区域性断裂,如图 5 所示。

准噶尔盆地大部广泛发育侵入岩和火山岩(吴晓智等,2009;李江海等,2015),油气勘探工作所揭示覆盖区下晚古生代以来的侵入岩主要为酸性与中酸性,火山岩主要为玄武质、安山质和英安质(吴晓智等,2009)。笔者根据近年在该区域岩石物性工作发现,酸性、中酸性岩浆岩磁性较弱,而基性、超基性岩具有较强的磁性。准噶尔盆地腹部(尤其南部区域)的高、中宽缓正磁异常背景(图 5)表明该区域中下地壳存在规模较大磁性层,而已揭示的盆地内条带或环带分布的基性、超基性火山岩对应着区内正磁异常背景上高幅值局部异常。准噶尔盆地北部额尔齐斯构造区磁力高异常带位于额尔齐斯断裂带以北区域,中段为覆盖区,根据东西两侧出露的前寒武—古生代地层,该带磁异常可能是由古生代褶皱基底(李锦铁和徐新,2004)以及基性、超基性岩所致。东准噶尔与吐哈盆地南部的磁力高异常具有相似的特征,李锦铁等(2006a,2006b)认为可能是“古陆”基底,磁异常由古老变质岩系引起。东准噶尔与吐哈盆地之间博格达造山带出露的古生代岛弧火山岩系(马瑞士等,1990)以及局部的基性—超基性侵入岩是引起该地段磁异常的原因。西准噶尔在古生代洋陆转化过程中和后期陆内演化期间经历了洋内俯冲增生,残留多条蛇绿混杂岩带和古大陆边缘增生体系(Feng et al., 1989; Kwon et al., 1989; Wang et al., 2003; Zhang et al., 2011a, 2011b; Xu et al.,

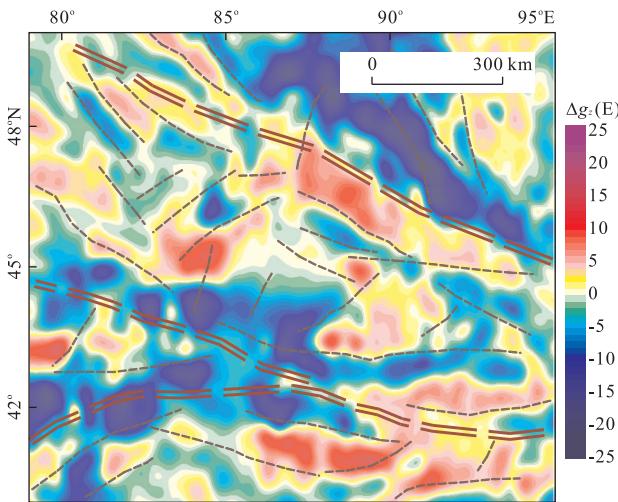
图 4 重力异常垂直导数 Δg_0 与异常特征线

Fig.4 Vertical derivative of Bouguer gravity anomaly and its characteristic lines

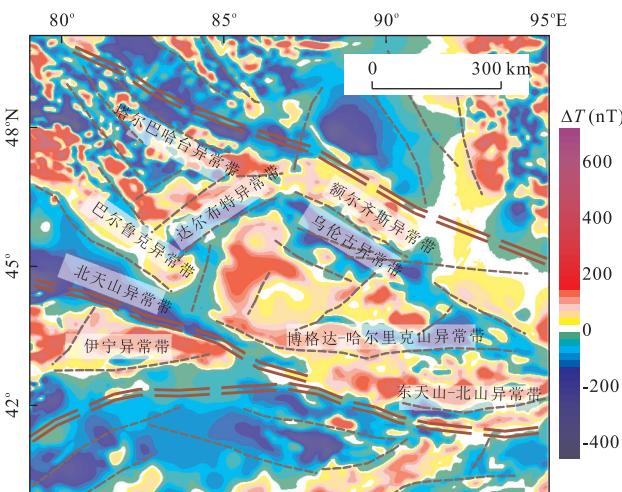


图 5 重、磁异常特征区带

Fig.5 Characteristic zones derived from features of gravity and magnetic anomalies

底图为图 3 所示磁异常

2012), 形成复杂的岩浆体系, 该区域磁异常主要由基性—超基性侵入岩和火山岩引起。伊宁地块上的高值正磁异常分布于中部的覆盖区, 区内广泛发育古生代岛弧火山岩(李永军等, 2010), 盆地基底可能为残余洋片, 磁异常可能由基性—超基性基底所致。

3 地壳磁性结构及其构造意义

3.1 地壳物质磁化率成像方法

利用岩石圈磁异常解释大陆地壳构造是近年来固体地球物理发展的新领域。通过对岩石圈磁异常

的反演笔者可获得岩石圈磁性物质结构, 为深入了解本区岩石圈磁性结构提供依据。

本文采用 Li and Oldenburg(1996)提出的反演方法, 对研究区 EMAG2 磁异常进行三维磁化率反演。反演目标函数 ϕ 包含数据拟合差函数 ϕ_d 和模型目标函数 ϕ_m , 并且通过正则化因子 μ 平衡两者的相应权重, 即 $\phi = \phi_d + \mu\phi_m$ 。其中, 模型目标函数 ϕ_m 选择“最光滑”模型, 在反演过程中实现对反演模型的复杂度和平滑程度的约束控制作用; 同时对于当前反演计算最合适的正则化因子则由广义交叉验证法(Li and Oldenburg, 2003)计算得到。

根据磁学原理, 岩石圈内温度高于居里温度的岩石将失去磁性, 因而在反演计算过程中需要考虑岩石圈内居里温度分布对反演结果的影响。本文采用谱分析方法(Tanaka *et al.*, 1999; Bouligand *et al.*, 2009), 依据研究区磁异常对居里面深度进行了估计, 并将其作为参考信息加入模型目标函数, 最终实现对反演结果的约束。本区居里面深度变化范围约为 20~49 km, 故将反演范围设置在研究区的核心区域, 即经度 80.5°~89.5°与纬度 40.5°~49.5°以及深度 0~60 km 范围内, 且水平方向和深度方向的网格剖分长度分别为 10 km 和 5 km。

3.2 地壳磁化率变化特征

图 6 给出了部分深度段的磁化率横向变化, 图中磁化率数值不代表真实磁化率, 而是表示磁化率的相对变化。

反演获得的地壳磁化率三维变化给出了许多基底特征信息。从深度上看, 图 6a 显示了本区地壳表层磁性岩石分布情况, 与出露和隐伏的侵入岩及火山岩有较好的对应。随着深度增加, 高磁性地壳物质逐渐凸显在准噶尔盆地腹部、西准噶尔、博格达造山带、伊宁盆地等区域, 在接近居里等温面深度附近开始降低。强磁性物质更多地分布在中下地壳, 即 20~40 km 深度范围内, 高磁性意味着基性、超基性地壳物质的富集。显然, 不同区域地壳磁性随着深度变化存在差异, 准噶尔盆地核心区域高磁性物质从地壳表层延伸至下地壳, 且横向延展相对完整, 位于伊宁盆地狭长区域的高磁性地壳也有类似的特征; 准噶尔盆地北部、东准噶尔大部区域、博格达以北山前以及吐哈盆地区域在不同深度上显示地壳处于稳定中高磁性, 局部构造带上具有较高的磁化率; 西准噶尔则显示该区域地壳由不均匀磁性地体构成。

笔者从三维磁化率成像区域中截取了 5 条典型剖面(图 7)来分析准噶尔盆地及周边的地壳磁性结

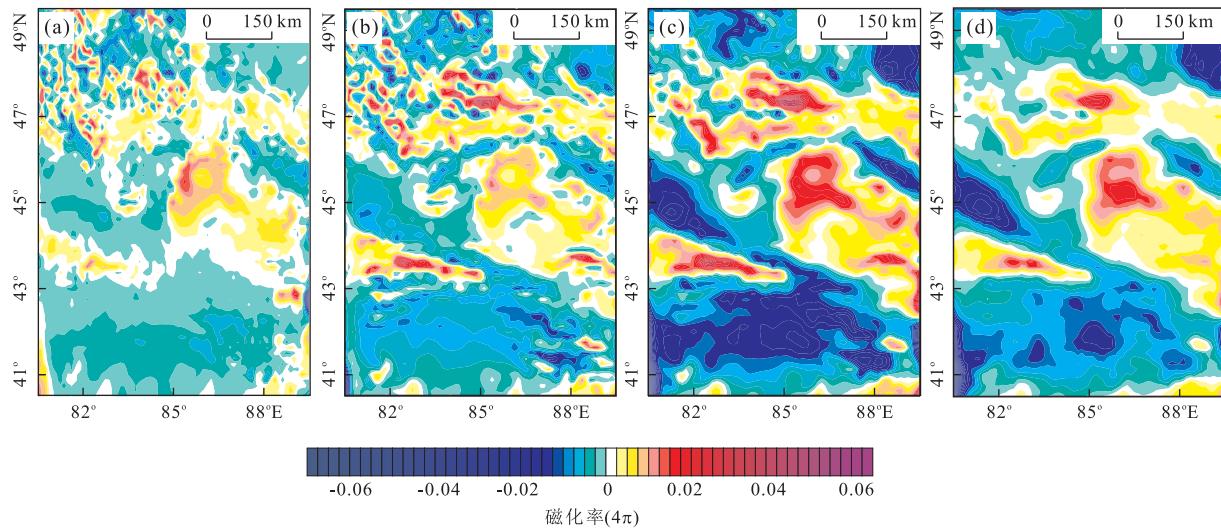


图 6 不同深度段的地壳平均磁化率异常

Fig.6 Horizontal slices of crustal the average of anomalous susceptibility distribution of different depths
a.0~5 km; b.15~20 km; c.30~35 km; d.40~45 km

构特征。从这些剖面上磁化率的变化及其分布可发现以下几个特点:(1)准噶尔盆地中下地壳存在一个相对完整的高磁性层,剖面 AA' 西段显示了磁性较高,东段(除博格达山构造带高磁化率以外)属中高磁性,显示该区域地壳具有较完整的磁性结构,但高磁性层向北、向南逐渐演变为独立高磁或中高磁块体(见剖面 BB'、CC'、DD'),有明显的南北分带特点;(2)从剖面 AA' 和 BB' 可以看到,西准噶尔地壳磁性变化较大,应该是这个区域多期的岩浆活动和构造演化的写照,达尔布特断裂之下的纵向高磁性条带或许是基性—超基性岩赋存的区带(剖面 AA');(3)剖面 AA'、BB'、CC' 和 DD' 上均显示东准噶尔地壳磁性结构不完整,具有“断块”特征,且磁化率整体上略低于准噶尔盆地地壳,吐哈盆地地壳磁性与东准噶尔相似;(4)剖面 CC'、DD' 和 EE' 显示,阿尔泰及天山造山带表现为低磁化率,而处于南、北天山之间的伊宁盆地地壳具有高磁化率。

3.3 地壳磁性结构及其构造意义

岩石磁学研究表明,当磁性岩石受到高压作用,会因磁畴被破坏而失去磁性。而地壳磁性结构连续完整,说明其未经严重破坏和改造。纵观准噶尔盆地及其周边区域不同深度的地壳磁化率异常分布,准噶尔盆地地壳具有相对完整且厚度稳定的高磁性层,仅盆地南侧略有减薄,表明自古生代以来准噶尔盆地地壳磁性层保存基本完好。盆地北部(以卡拉麦里构造带及其向西延伸段以北)乌伦古凹陷一带为低磁性区,卡拉麦里构造带被认为是西伯利亚板块

与哈萨克斯坦板块的缝合带(李锦铁等,1990,1992;肖序常等,1992),若准噶尔盆地地壳高磁性为残留古洋壳板片的反映,剖面 DD' 和 EE' 中部位置的高磁性体具有向北下插的趋势,可推测古洋板片有可能向北俯冲至阿尔泰陆缘岩石圈之下,或许能表明哈萨克斯坦—准噶尔板块向北俯冲至西伯利亚板块之下(刘希军等,2007)。关于准噶尔盆地与西准噶尔石炭纪的构造关系,多数学者根据对出露于西准噶尔地区的蛇绿混杂岩的研究,认为达尔布特蛇绿岩产生的构造环境为洋壳俯冲(高睿等,2013),即古准噶尔洋板片俯冲于西准噶尔地块之下,这种假设与 AA' 和 BB' 两条剖面给出高磁层形态特征相契合。若两者皆为洋片俯冲,其前沿的负异常带则可能是残留板片破碎结构以及超基性岩浆岩水化后(磁性骤减)造成磁性物质缺失所致。伊宁盆地地壳具有较高的磁性,从磁化率强度来看,明显有拼接的迹象(剖面 EE'),该地区出露的基性洋壳岩石(李永军等,2010),是否说明磁性地壳层是古亚洲洋关闭的残留物?

东准噶尔和吐哈盆地地壳具有相似磁性分布,尽管其间被博格达—哈尔里克造山带所隔。许多学者(李锦铁和徐新,2004;李锦铁等,2006a)认为它们是残留的古陆块,若这些推论符合事实,根据地壳磁化率的特征,准噶尔盆地内的洋壳基底区域十分有限,其仅限于卡拉麦里构造带以南、乌鲁木齐以西区域。事实上,从地壳磁性结构角度很难分辨准噶尔盆地与东准噶尔之间的构造界限。

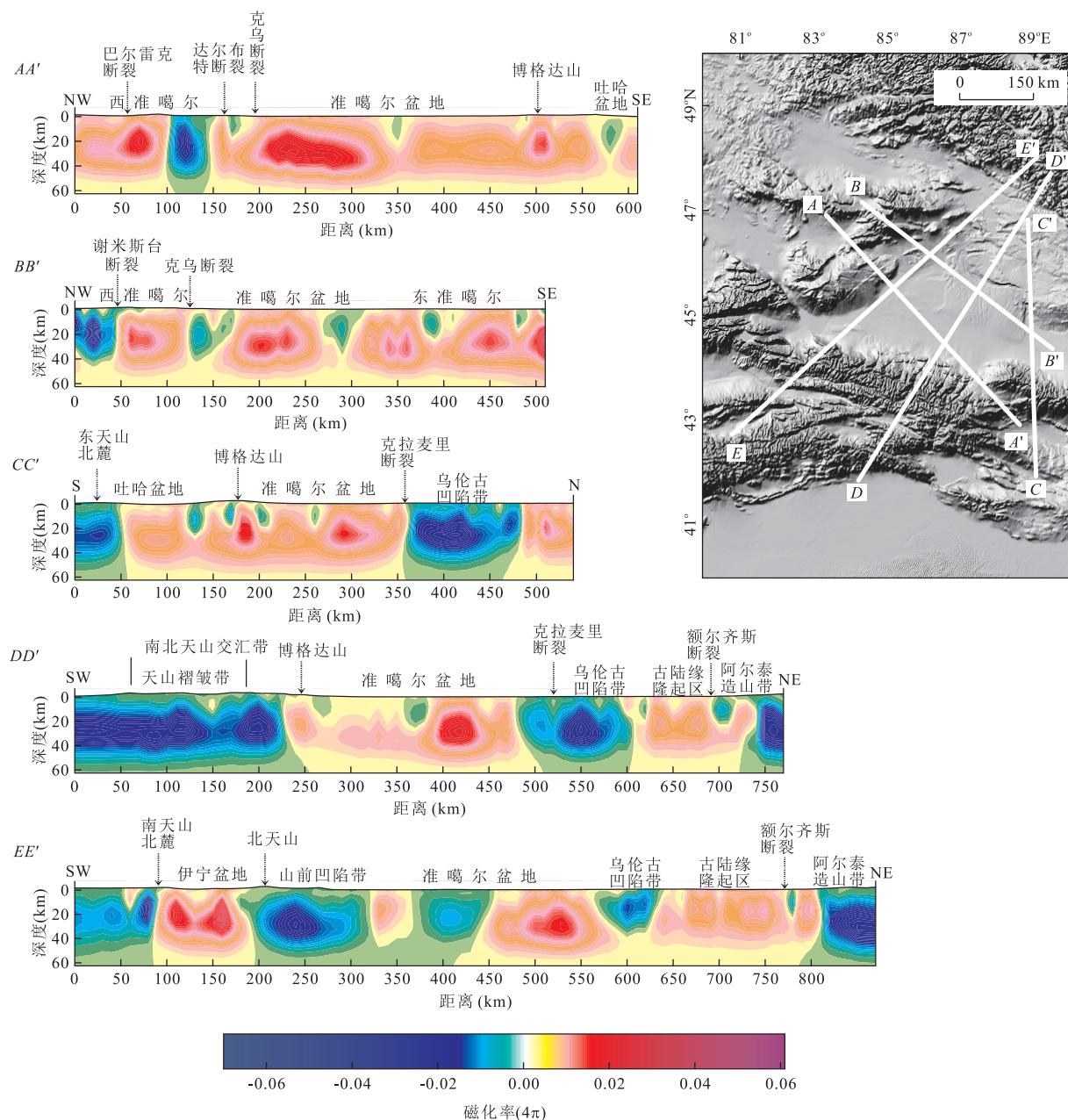


图7 典型剖面上的地壳磁性特征

Fig.7 Magnetic characteristics of crust along typical cross-sections

各剖面磁化率采用相同的色标和比例尺

准噶尔盆地区域地壳磁性层相对完整反映了其岩石圈较为坚硬的特征。杜劲松(2014)根据近年来卫星磁异常研究了中国大陆及其邻区岩石圈磁性特征,认为准噶尔盆地岩石圈具有较高的径向积成异常磁化率,表现出古洋壳基底的磁性特征。许顺芳等(2015)利用卫星重力异常反演得到的该地区岩石圈密度结构显示,准噶尔盆地岩石圈密度结构较为完整,尤其在上地幔(60 km以下)区域。相关的研究表明,准噶尔盆地区域与中国西北部较稳定的构造单

元如塔里木盆地(中央隆起区)、柴达木盆地、鄂尔多斯等地块相似,具有较厚的有效弹性厚度(Chen et al., 2013),表明自古生代(约300 Ma)以来,其壳幔结构保留较为完整。

4 结论

(1) 地壳磁化率变化显示了阿尔泰、准噶尔及天山3个大地构造区域不同的构造属性。阿尔泰褶皱

带低磁性结构,反映了古大陆陆缘挤压、拉张及形变的构造特征;准噶尔盆地腹部磁性结构相对完整,西准噶尔区域则表现出与洋壳俯冲相关弧后环境的磁性结构,东准噶尔区域(包括吐哈盆地)磁性层较厚且连续,具有古陆基底特征;天山褶皱带低磁性具有典型造山带的“支离破碎”结构特征,磁化率异常的展布方向与构造走向相关。

(2)地壳表层(约 5 km)高磁化率条带与地表出露的基性—超基性岩区带相对应,如西准噶尔区域的唐巴勒、玛依勒、达尔布特、巴尔雷克克拉玛依和洪古勒楞蛇绿岩带,盆地北部的阿尔曼特蛇绿岩带,东准噶尔的克拉麦里蛇绿岩带、以及博格达山的巴音沟蛇绿岩带等。此外,一些基性、超基性火山岩分布区带也具有高磁性显示。

(3)研究区内多数浅表高磁性区带与其深部高磁性层相关联,但有些与深部没有联系,尤其在造山带内(剖面 DD' 和 EE'),这些浅部高磁性物质可能来源于构造作用上侵就位,因而不能作为解释深部问题的依据。

(4)除造山带以外,研究区内地壳磁化率异常反映了一些区域断裂构造及其深部延伸特征。如额尔齐斯断裂带、克拉麦里断裂带、达尔布特断裂带、克乌断裂带等。此外,克拉玛依以东(车排子)至奎屯(独山子)一带,地壳磁化率为低值带,因处于覆盖区,有关其深部成因未见报导。笔者认为该带可能为裂谷遗迹。石油勘探工作(夏显佰和靳军,2003)已揭示该带为切割地壳表层古生代—中生代地层的断裂带—红排断裂带,其影响着东、西两侧油气构造的发育。

综上所述,本文提出的研究区三维磁化率异常分布,定量地解释了该地区的区域岩石圈磁异常成因,为深入剖析西准噶尔地区岩石圈构造及其与周边构造单元之间的关系提供了有益的资料和参考。

致谢:所采用的岩石圈磁异常数据来自 <http://www.geomag.us/models/emag2.html>,两位匿名审稿人给予了宝贵的建议,在此表示由衷感谢。

References

- Bouligand,C.,Glen,J.M.G.,Blakely,R.J.,2009.Mapping Curie Temperature Depth in the Western United States with a Fractal Model for Crustal Magnetization.*Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,119(4):2595—2630.doi:10.1029/2009JB006494
- Carroll,A.R.,Liang,Y.,Graham,S.A.,et al.,1990.Junggar Basin,Northwest China:Trapped Late Paleozoic Ocean.*Tectonophysics*,186(1):1—14.doi:10.1016/0040—1951(90)90004—R
- Carroll,A.R.,Graham,S.A.,Hendrix,M.S.,et al.,1995.Late Paleozoic Tectonic Amalgamation of Northwestern China:Sedimentary Record of the Northern Tarim,Northwestern Turpan, and Southern Junggar Basins.*Geological Society of American Bulletin*,107(5):571—594.doi:10.1130/0016—7606(1995)107<0571:LPTAON>2.3.CO;2
- Chen,B.,Chen,C.,Kaban,M.K.,et al.,2013.Variations of the Effective Elastic Thickness over China and Surroundings and Their Relation to the Lithosphere Dynamics.*Earth and Planetary Science Letters*,363:61—72.doi:10.1016/j.epsl.2012.12.022
- Cheng,S.D.,Wang,Y.L.,1998.Basic Characteristics of Geotectonic Evolution of Xinjiang.*Xinjiang Geology*,16(2):97—107(in Chinese with English abstract).
- Du,J.S.,2014.Study on Processing,Forward Modeling and Inversion Algorithms of Satellite Magnetic Anomaly Data in Spherical Coordinate System (Dissertation).China University of Geosciences,Wuhan,128—155(in Chinese with English abstract).
- Feng,Y.,Coleman,R.G.,Tilton,G.,et al.,1989.Tectonic Evolution of the West Junggar Region,Xinjiang,China.*Tectonics*,8(4):729—752.doi:10.1029/TC008i004p00729
- Gao,R.,Xiao,L.,Wang,G.C.,et al.,2013.Paleozoic Magmatism and Tectonic Setting in West Junggar.*Acta Petrologica Sinica*,29(10):3413—3434(in Chinese with English abstract).
- Han,B.F.,1991.The Middle Devonian Bimodal Association of Volcanic Rocks in the Northern Area of East Junggar,Xinjiang.*Acta Geologica Sinica*,66(4):317—328(in Chinese with English abstract).
- Huang,J.Q.,Jiang,C.F.,Wang,Z.X.,1990.The According Style Opening-Closing Evolution of Structures over Xinjiang and Surroundings.*Scientia Xinjiang Geology*,1:3—14(in Chinese).
- Jiang,Y.D.,1984.A Preliminary Approach to the Basement of Junggar District.*Xinjiang Geology*,2(1):11—16(in Chinese with English abstract).
- Kwon,S.T.,Tilton,G.R.,Coleman,R.G.,et al.,1989.Isotopic Studies Bearing on the Tectonics of the West Junggar Region,Xinjiang,China.*Tectonics*,8(4):719—727.doi:10.1029/TC008i004p00719
- Li,C.Y.,Wang,J.,Liu,X.Y.,et al.,1982.The Asian Tectonic Map and Its Explanatory Notes.China Cartographic Publishing House,Beijing(in Chinese).
- Li,J.H.,Zhou,X.B.,Li,W.B.,et al.,2015.Preliminary Re-

- construction of Tectonic Paleogeography of Tarim Basin and Its Adjacent Areas from Cambrian to Triassic, NW China. *Geological Review*, 61(6): 1225—1234 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., He, G. Q., Xu, X., et al., 2006a. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148—168 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Wang, K. Z., Sun, G. H., et al., 2006b. Paleozoic Active Margin Slices in the Southern Turfan-Hami Basin: Geological Records of Subduction of the Paleo-Asian Ocean Plate in Central Asian Regions. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1087—1102 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., 1999. Brief Reviews on Some Issues of Frame Work and Tectonic Evolution of Xinjiang Crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405—419 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., Tang, Y. Q., et al., 1990. Main Characteristics of Late Paleozoic Plate Tectonics in the Southern Part of East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305—316 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., Tang, Y. Q., et al., 1992. Metal Deposits and Plate Tectonics in Northern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 10(2): 138—146 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xu, X., 2004. Major Problems on Geologic Structures and Metallogenesis of Northern Xinjiang, Northwest China. *Xinjiang Geology*, 22(2): 119—124 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Li, Z. C., Tong, L. L., et al., 2010. Revisit the Constraints on the Closure of the Tianshan Ancient Oceanic Basin: New Evidence from Yining Block of the Carboniferous. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2905—2912 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Oldenburg, D. W., 1996. 3-D Inversion of Magnetic Data. *Geophysics*, 61(2): 394—408. doi: 10.1190/1.1443968
- Li, Y., Oldenburg, D. W., 2003. Fast Inversion of Large-Scale Magnetic Data Using Wavelet Transforms and a Logarithmic Barrier Method. *Geophysical Journal International*, 152(2): 251—265. doi: 10.1046/j.1365—246X.2003.01766.x
- Liu, X. J., Xu, J. F., Hou, Q. Y., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Karamaili Ophiolite in East Junggar, Xinjiang: Products of Ridge Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1591—1602 (in Chinese with English abstract).
- Maus, S., 2009. EMAG2: A 2-Arc Min Resolution Earth Magnetic Anomaly Grid Compiled from Satellite, Airborne, and Marine Magnetic Measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(8): 1—12. doi: 10.1029/2009GC002471
- Sengör, A. M. C., Natalin, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364 (6435): 299—307. doi: 10.1038/364299a0
- Shako, R., Föste, C., Abrykosov, O., et al., 2014. EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model Including GOCE Data. In: Flechtner, F., Sneeuw, N., Schuh, W. D., eds., Observation of the System Earth from Space-CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions. Springer, Berlin, 155—161.
- Tanaka, A., Okubo, Y., Matsubayashi, O., 1999. Curie Point Depth Based on Spectrum Analysis of the Magnetic Anomaly Data in East and Southeast Asia. *Tectonophysics*, 306(3): 461—470. doi: 10.1016/S0040—1951(99)00072—4
- Wang, Z. H., Sun, S., Li, J. L., et al., 2003. Paleozoic Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang, China: Geochemical and Geochronological Constraints from the Ophiolites. *Tectonics*, 22(2): 1—15. doi: 10.1029/2002TC001396
- Wu, Q. F., 1986. Structural Evolution and Prospects of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 7(1): 29—37 (in Chinese).
- Wu, X. Z., Qi, X. F., Tang, Y., et al., 2009. Genetic Types and Hydrocarbon Exploration Directions of Volcanic Rocks in Eastern and Western Junggar. *China Petroleum Exploration*, 16(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Xia, X. B., Jin, J., 2003. Characteristics of Jurassic Structural Geology and Analysis of Exploration Potential in Che-Guai Area of Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 8(4): 29—33 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., et al., 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Geological Publishing House, Beijing, 104—123 (in Chinese).
- Xu, S. F., Chen, C., Du, J. S., et al., 2015. Characteristics and Tectonic Implications of Lithospheric Density Structures beneath Western Junggar and Its Surroundings. *Earth Science*, 40(9): 1556—1565 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z., Han, B. F., Ren, R., et al., 2012. Ultramafic-Mafic Melange, Island Arc and Post-Collisional Intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic Intra-Oceanic Subduction-Accretion Process.

- Lithos*, 132: 141—161. doi: 10.1016/j.lithos.2011.11.016
- Zhang, J.E., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2011a. A Devonian to Carboniferous Intra-Oceanic Subduction System in Western Junggar, China. *Lithos*, 125 (1): 592—606. doi: 10.1016/j.lithos.2011.03.013
- Zhang, J.E., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2011b. Kinematics and Age Constraints of Deformation in a Late Carboniferous Accretionary Complex in Western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 19 (4): 958—974. doi: 10.1016/j.gr.2010.10.003
- Zhang, C., Huang, X., 1992. The Ages and Tectonic Settings of Ophiolites in West Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38 (6): 509—524 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 成守德,王元龙,1998.新疆大地构造演化基本特征.新疆地质,16(2):97—107.
- 杜劲松,2014.基于球坐标系的卫星磁异常数据处理与正反演方法研究(博士学位论文).武汉:中国地质大学,128—155.
- 高睿,肖龙,王国灿,等,2013.西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景.岩石学报,29(10):3413—3434.
- 韩宝福,1991.新疆东准噶尔北部地区中泥盆世双峰式火山岩组合.地质学报,66(4):317—328.
- 黄汲清,姜春发,王作勋,1990.新疆及邻区板块开合构造及手风琴式运动.新疆地质科学,1:3—14.
- 江远达,1984.关于准噶尔地区基底问题的初步探讨.新疆地质,2(1):11—16.
- 李春昱,王茎,刘雪亚,等,1982.亚洲大地构造图及其说明书.北京:地图出版社.
- 李江海,周肖贝,李维波,等,2015.塔里木盆地及邻区寒武纪—三叠纪构造古地理格局的初步重建.地质论评,61 (6):1225—1234.
- 李锦轶,何国琦,徐新,等,2006a.新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨.地质学报,80(1):

- 148—168.
- 李锦轶,王克卓,孙桂华,等,2006b.东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片:中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录.岩石学报,22(5):1087—1102.
- 李锦轶,肖序常,1999.对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述.地质科学,34(4):405—419.
- 李锦轶,肖序常,汤耀庆,等,1990.新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征.地质论评,36(4):305—316.
- 李锦轶,肖序常,汤耀庆,等,1992.新疆北部金属矿产与板块构造.新疆地质,10(2):138—146.
- 李锦轶,徐新,2004.新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题.新疆地质,22(2):119—124.
- 李永军,李注苍,佟丽莉,等,2010.论天山古洋盆关闭的地质时限——来自伊宁地块石炭系的新证据.岩石学报,26 (10):2905—2912.
- 刘希军,许继峰,侯青叶,等,2007.新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学:洋脊俯冲的产物.岩石学报,23(7):1591—1602.
- 马瑞士,叶尚夫,王赐银,等,1990.东天山造山带构造格架和演化.新疆地质科学,2:21—36.
- 吴庆福,1986.准噶尔盆地发育阶段、构造单元划分及局部构造成因概论.新疆石油地质,7(1):29—37.
- 吴晓智,齐雪峰,唐勇,等,2009.东西准噶尔火山岩成因类型与油气勘探方向.中国石油勘探,16(1):1—9.
- 夏显佰,靳军,2003.准噶尔盆地西北缘车一拐地区侏罗系构造地质特征与勘探潜力分析.中国石油勘探,8(4):29—33.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,等,1992.新疆北部及邻区大地构造.北京:地质出版社,104—123.
- 许顺芳,陈超,杜劲松,等,2015.西准噶尔及邻区的岩石圈密度结构特征及其构造意义.地球科学,40 (9):1556—1565.
- 张弛,黄萱,1992.新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨.地质论评,38(6):509—524.