

doi:10.3799/dqkx.2015.140

西准噶尔及邻区的岩石圈密度结构特征及其构造意义

许顺芳^{1,2}, 陈超^{1,2*}, 杜劲松¹, 孙石达¹, 胡正旺^{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: 对西准噶尔及周边地区壳幔结构的研究是揭示准噶尔盆地演化的重要基础。利用最新的卫星重力场模型, 通过计算得到西准噶尔及周边地区的布格重力异常, 进而采用三维反演技术, 对西准噶尔及周边地区的地壳与上地幔顶部进行密度成像, 得到了0~80 km深度范围的密度异常结构。地壳密度分布显示古准噶尔洋壳有可能向NE和NW分别俯冲于西伯利亚板块和西准噶尔地块之下。上地幔顶部密度变化表明: 阿尔泰褶皱带具有相对较低的密度, 可能为古大陆巨厚的硅铝层所致; 哈萨克斯坦—准噶尔盆地具有相对完整的高密度结构; 天山褶皱带区域的密度大幅度变化刻画了超岩石圈断裂对岩石圈的切割以及岩石圈形变与构造活动的痕迹。

关键词: 西准噶尔; 卫星重力; 布格重力异常; 密度成像; 岩石圈密度结构; 构造; 地球物理。

中图分类号: P313

文章编号: 1000-2383(2015)09-1556-10

收稿日期: 2015-05-05

Characteristics and Tectonic Implications of Lithospheric Density Structures beneath Western Junggar and Its Surroundings

Xu Shunfang^{1,2}, Chen Chao^{1,2*}, Du Jinsong¹, Sun Shida¹, Hu Zhengwang^{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: Structures in the crust and uppermost mantle beneath western Junggar and its surroundings, the key to better understanding of the tectonic evolution of the Junggar basin, are studied in this paper. Firstly, the Bouguer gravity anomaly is calculated from the satellite gravitational field model. Then 3D inversion technique is utilized, and the density imaging is operated in the crust and uppermost mantle beneath the western Junggar and its surroundings and finally the anomalous density structure at the depth range of 0–80 km is obtained. Crustal density distribution in the ancient oceanic crust of the Junggar indicates the possible subductions under the Siberian plate northeastwardly and the western Junggar northwestwardly. Density distribution in the uppermost mantle suggests that the relatively low density beneath Altay fold belt may have resulted from the thick sialic layer of the ancient continent, and Kazakhstan plate & Junggar basin are dominated by a relatively whole high-density structure while the significant density changes beneath the Tianshan fold belt describe the ultra-crustal deep faults and also the nicks of the tectonic activities and the lithospheric deformations.

Key words: western Junggar; satellite gravity; Bouguer gravity anomaly; density imaging; lithospheric density structure; tectonics; geophysics.

中亚造山带位于东欧地台—卡拉库姆地台—塔里木地台—中朝地台和西伯利亚地台之间, 是全球

显生宙地壳增生与改造最显著的地区。许多学者认为它是一条典型的由一系列俯冲—增生作用而形成

基金项目: 国家科技部国际科技合作专项项目 (No. 2010DFA24580); 中国地质调查局西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查试点项目 (No. 1212011220245); 湖北省自然科学基金项目 (No. 2015CFB361); 中国博士后科学基金面上资助项目 (No. 2015M572217)。

作者简介: 许顺芳 (1964—), 男, 副教授, 主要从事重、磁数据处理与解释研究。E-mail: xushfang@cug.edu.cn

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

引用格式: 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——中国地质大学学报, 40(9): 1556–1565.

的复合造山带 (Şengör *et al.*, 1993; Windley *et al.*, 2002; Xiao and Kusky, 2009). 有关地壳增生的研究表明:地壳的侧向增生发生在板块边界,与俯冲增生密切相关,以蛇绿混杂岩、增生杂岩体等为主要特征;而垂向增生则与后碰撞背景紧密联系,由幔源物质底侵导致新生地壳增厚. 西准噶尔作为中亚造山带的一部分,夹持于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块之间. 许多学者认为:西准噶尔在古生代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);在古生代的洋陆转化过程中、后期陆内演化阶段,形成复杂的岩浆体系,包括古洋盆、岛弧、后碰撞等多种不同类型构造背景下的岩浆活动 (Xiao *et al.*, 2004; Xiao and Kusky, 2009; 周晶等, 2008; Geng *et al.*, 2009; 陈石和郭召杰, 2010; Yang *et al.*, 2012). 西准噶尔在晚古生代构造演化极为复杂,在古生代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.*, 2012). 关于西准噶尔的研究已经很深入,但是仍存在很多争议,例如西准噶尔晚古生代年代学格架和构造背景 (童英等, 2010; 陈石和郭召杰, 2010; 陈家富等, 2010);几个古板块边界的具体位置 (成守德等, 1986; 李锦轶等, 1992; 何国琦等, 1994; 程裕洪等, 1995);西准噶尔显生宙的地壳增生 (Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; 韩宝福等, 2006);西准噶尔的基底性质 (Zhang *et al.*, 1984; Coleman, 1989; Feng *et al.*, 1989; Kwon *et al.*, 1989; Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Chen and Arakawa, 2005; Zheng *et al.*, 2007)和西准噶尔晚古生代的构造演化 (周晶等, 2008; Xiao and Kusky, 2009; 陈石和郭召杰, 2010; Tang *et al.*, 2010, 2012a, 2012b; Ma *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; 艾可可和季良军, 2015). 尽管几十年来的深部探测工作一定程度上揭示了该地区的岩石圈结构,然而西准噶尔区域岩石圈结构及其与南北两侧构造带的关系仍然存在许多疑问.

随着卫星对地观测技术的发展,卫星重力和磁测资料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卫星重力场 EIGEN-6C4 模型 (Shako *et al.*, 2014), 根据西准噶尔及其周边区域的卫星重力异常特征,分析该地区岩石圈密度结构与大地构造之间的关系,为深入剖析这一结构

复杂区域的岩石圈特征提供新的依据.

1 区域大地构造背景

根据肖序常等 (1992) 的研究,西准噶尔及其邻区以斋桑—卡拉麦里蛇绿岩带和乌拉尔—南天山为界,包括西伯利亚、哈萨克斯坦和中朝—塔里木这 3 个古板块的古生代地壳构造分区 (图 1). 在研究区中西北部的西伯利亚板块,主要包括了以前震旦纪变沉积岩系为特征的阿尔泰早古生代陆坡沉积区和额尔齐斯晚古生代早期拉张陆缘岩浆带构成的阿尔泰陆壳板段;在准噶尔晚古生代早期活动大陆边缘板段,该单元内未发现前震旦纪结晶基底出露,下伏地壳以过渡型地壳为主要特征,在组成上以晚古生代早期活动大陆边缘沉积组合为主,还有一些规模不大的地体散布其中;在北准噶尔晚古生代早期洋壳板段,该板段出露有大量晚古生代早期蛇绿岩,南界为达拉布特—卡拉麦里晚古生代早期海沟,构造上以叠瓦构造为特征,冲断作用方向自北向南,蛇绿岩仰冲到其南面的哈萨克斯坦板块的陆缘之上. 中部的哈萨克斯坦板块主要由北天山古生代活动陆缘板段、伊犁—中天山陆壳板段和南天山古生代活动大陆边缘板段组成,北以达拉布特—卡拉麦里缝合线为界与西伯利亚板块相邻,南以南天山缝合线为界与塔里木板块相接;它缺乏一个统一的前震旦纪结晶基底,由一些大小不等的、具有前震旦纪结晶基底的陆块拼接而成,是一个以早古生代褶皱基底为核心的独立板块.

2 岩石圈密度特征

2.1 卫星重力异常及其分布特征

卫星重力异常源于卫星轨道高度所测数据,并且经过区域地形校正之后得到的布格重力异常,能够较好地反映区域重力场及其与岩石圈物质密度分布的关系. 本文采用的卫星重力异常源于重力场模型 EIGEN-6C4 (Shako *et al.*, 2014), 其解算的球谐最高阶数为 2 190 阶,本文应用的解算阶数为 2~1 440 阶. 计算的卫星布格重力异常如图 2a 所示.

从布格重力异常图 (图 2a) 上看,哈萨克斯坦—准噶尔区域表现为相对重力高,其中准噶尔盆地区域重力异常相对低缓且简单,但周边区域的异常较为复杂. 西北部阿勒泰陆缘褶皱带为相对重力低异

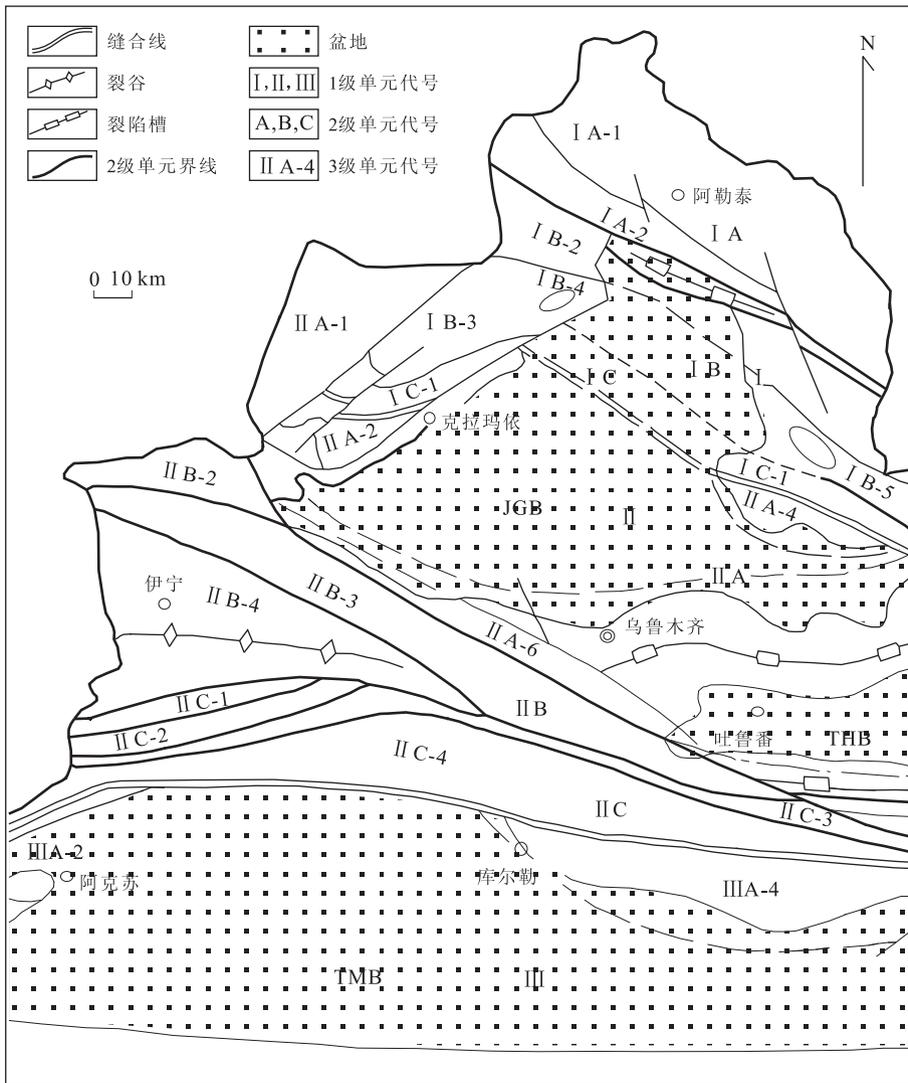


图 1 西准噶尔及邻区的区域大地构造示意

Fig. 1 The sketch of regional tectonics in the western Junggar and surroundings

I. 西伯利亚板块; I A. 阿尔泰陆壳板段; I B. 准噶尔晚古生代早期活动大陆边缘板块; I C. 北准噶尔晚古生代早期洋壳板段; II. 哈萨克斯坦板块; II A. 北天山古生代活动大陆边缘段; II B. 伊犁—中天山陆壳板段; II C. 南天山早—中生代活动大陆边缘板段; III. 塔里木板块; III A. 塔里木北缘陆壳板段、晚古生代末期—中生代上叠构造盆地; JGB. 准噶尔盆地; THB. 吐鲁番—哈密盆地; TMB. 塔里木盆地. 根据肖序常等(1992)修绘

常区;南部的天山造山带以条带状异常为主,总体上呈 NWW 走向;塔里木盆地区域则以低缓异常为主要特征. 局部异常显示区内大部分局部异常呈 NW 向展布,负异常带与高海拔山地对应,正异常带则与山间盆地对应,反映了本区的大地构造格局,其中唯有博乐—克拉玛依—和布克赛尔一带的重力高异常呈 NE 向分布,成为研究区重力异常的重要特征之一.

若以盆山边界为界限,区域重力场(图 2b)较好地反映了本区主要的构造单元岩石圈深部重力场背景. 而区域背景之上的局部重力异常(图 2c)则较为

详细地刻画了各构造单元之间交汇处的岩石圈构造及岩性特征. 区内北部的阿尔泰褶皱带东南的山前重力高值带反映了该区域岩石圈高密度特征,其明显受 NW 向构造的控制,尤其富蕴—福海一带大范围分布的重力高对应着准噶尔晚古生代活动大陆边缘板段,被认为是中国境内最大的西伯利亚板块二级构造单元(白文吉和杨经绥,1985;肖序常等,1992). 区内南部的天山褶皱带是本区重力异常变化最剧烈的区域,正负异常条带展示了该区岩石圈深大断裂分布及其相互关系,其中南天山造山带上的重力高值带显示了塔里木板块与其衔接带上岩石圈

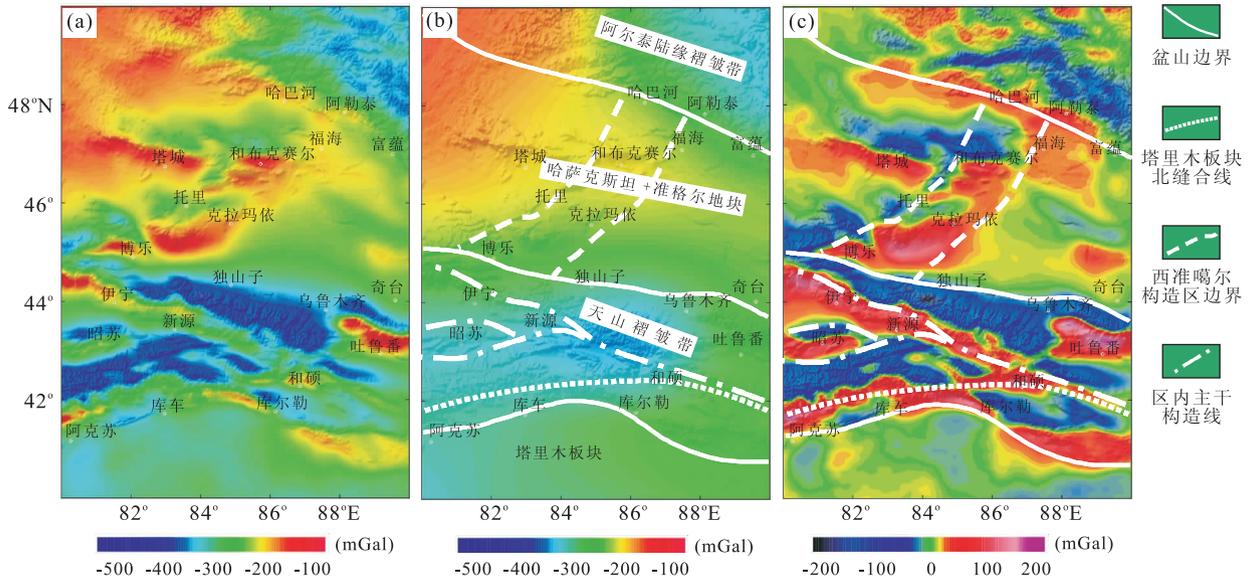


图 2 研究区卫星重力异常

Fig. 2 Satellite gravity anomaly maps in the study region

叠加底图为地形影像;a. 布格重力异常;b. 区域重力异常;c. 局部重力异常

的高密度物质带的存在;区内天山褶皱带与准噶尔盆地衔接带以北天山的重力低值带为特征,这与地震资料显示的准噶尔盆地南缘莫霍面加深特征对应(熊小松, 2010). 哈萨克斯坦地块与准噶尔盆地交汇处呈现的 NW 及 NE 向重力高异常带位于准噶尔及其以北的塔尔巴哈台山南缘一带,被认为是洋内俯冲增生带(Feng *et al.*, 1989),具有古洋盆、岛弧、后碰撞等多种不同类型构造背景(Xiao and Kusky, 2009),该区域广泛出露蛇绿混杂岩(冯益民, 1986; 何国琦等, 2007),这或许是引起重力高异常的成因之一. 与此成因相似,区内准噶尔盆地东部也具有重力高异常,对应将军庙地体.

2.2 岩石圈密度成像

利用卫星重力异常解释岩石圈构造是近年来卫星重力测量研究的新领域. 通过卫星重力异常数据,可以反演获得岩石圈密度异常结构,进而为岩石圈构造研究提供依据.

笔者采用 Li and Oldenburg(1998)提出的反演方法,对计算获得的卫星布格重力异常数据进行三维反演. 反演目标函数包含数据拟合差函数和模型目标函数,并且通过正则化因子平衡两者的作用,即模型目标函数选择“最光滑”模型,在反演过程中对反演模型起到光滑约束作用.

在反演计算中,考虑到该区域的地壳厚度与岩石圈厚度变化(邱瑞照等, 2008);准噶尔盆地的地壳厚度在南缘的乌苏为 44 km,向南至北天山莫霍

面加深到 55 km,由乌苏向北逐渐加深到 56 km 左右,在准噶尔盆地中部岩石圈厚度为 120 km,向南北增厚,北缘可达 180 km,南缘为 160 km;塔里木盆地内地壳厚度为 41~42 km,岩石圈平均厚度超过 200 km,最深处达 250 km;准噶尔盆地北缘的阿尔泰善、准噶尔盆地南缘和塔里木盆地北缘的天山地壳厚度为 50~55 km,岩石圈厚度为 170~200 km. 因此,综合考虑将反演区域剖分为 10 km×10 km×10 km 的离散块体,深度范围为 0~80 km. 由于地球内部密度随深度增大,地球正常密度也应随深度增大(方剑, 2006),因此相对于地球正常或参考密度而言,反演得到的岩石圈密度异常在不同深度上具有不同的实际密度含义.

2.3 岩石圈密度结构特征

图 3 给出了部分深度段上反演的密度异常分布. 从图 3a 中可见,在上地壳深度上(5 km),区域密度变化与表层构造对应,尤其在天山褶皱带区域,南、北天山超深断裂两侧均出现密度变异,展示了复杂的构造格局. 在阿尔泰褶皱带上, NW-NWW 向“片状”密度异常特征十分明显. 在西准噶尔区域,塔尔巴哈台山南缘高密度异常十分显著,而在克拉玛依后山一带高密度异常表现较弱,准噶尔盆地内密度变化相对平缓.

图 3b 展示了在中地壳深度上(25 km)的密度分布特征. 在天山褶皱带密度变化异常剧烈,巨大低密度异常区带主要对应北天山断裂带和南天山断裂

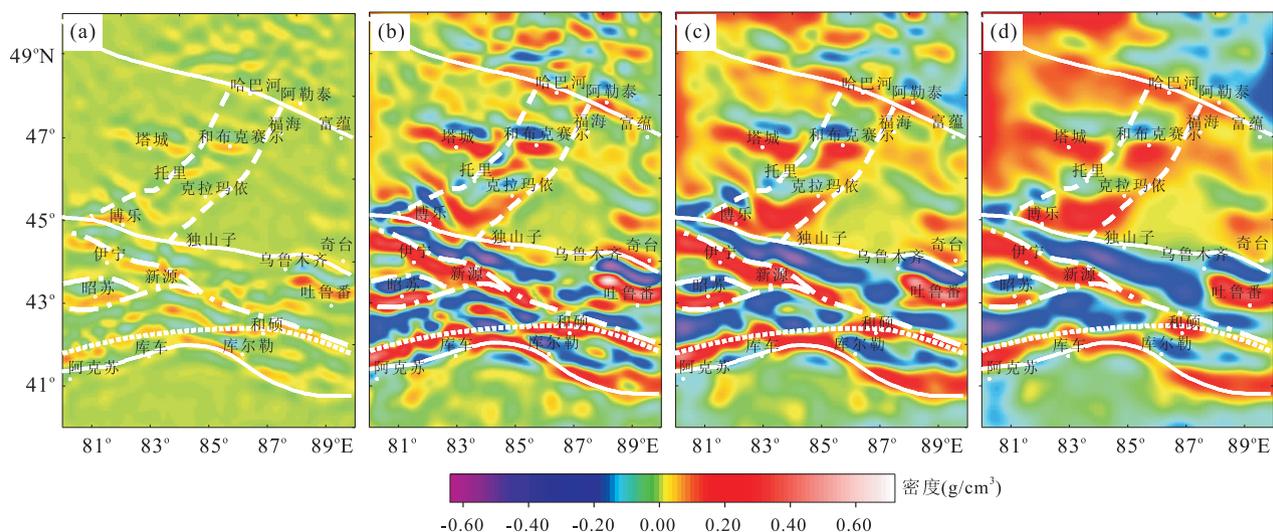


图 3 不同深度的岩石圈密度异常水平切片(图例同图 2)

Fig. 3 Horizontal slices of lithospheric anomalous density distribution at different depths

a. 5 km; b. 25 km; c. 45 km; d. 65 km

带的北缘地带. 阿尔泰褶皱带以相对孤立的高密度异常为主, 总体呈 NWW 向展布. 哈萨克斯坦—准噶尔盆地地区则以相对连续的局部高密度异常为主要特征, 其中准噶尔盆地中地壳密度异常显示了其复杂的地壳结构, 张先康等(2008)根据准噶尔盆地深反射地震资料推测盆地内存在多条超壳断裂, 也证实了盆地地壳结构并非完整. 在西准噶尔区域, 克拉玛依后山的 NE 向高密度异常开始显露, 且其西南端于唐巴勒连接一条 NW 向密度高异常带, 该密度异常带沿位于该处的唐巴勒—玛依勒 NW 向断裂带展布, 并延伸至哈萨克斯坦境内的阿拉湖; 分布于额敏—乌尔贾尔(哈萨克斯坦)和铁厂沟—和布克赛尔的高密度异常带, 与克拉玛依后山高密度异常带形成了西准噶尔地区上地壳密度结构, 其中, 分布于它们之间的低密度带以达尔布特断裂西北的密度异常带最为显著.

在地壳底部莫霍面附近深度上(45 km; 如图 3c), 阿尔泰、哈萨克斯坦—准噶尔及天山这 3 个主要构造单元区域的密度变化特征各异. 阿尔泰褶皱带区域上的局部高密度范围增大、幅值减小, 且低密度背景逐渐显露; 天山褶皱带上的超岩石圈断裂带密度异常依旧显著, 但南、北天山之间的高密度带逐渐消失; 哈萨克斯坦—准噶尔盆地地区密度有所增高, 且高密度带明显扩张, 而盆地内的密度异常显示具有南北分带的迹象.

如图 3d 所示, 上地幔顶部(65 km)密度变化进一步趋缓. 哈萨克斯坦—准噶尔盆地地区以高密度

异常为主, 但是结构趋于简单, 地壳构造痕迹依然可见. 阿尔泰褶皱带密度相对较低, 可能与巨厚的硅铝层成分的壳幔物质有关. 天山褶皱带上的超岩石圈断裂带密度异常有可能延伸至更大深度.

3 西准噶尔及周边岩石圈密度结构及其意义

纵观哈萨克斯坦—准噶尔盆地区域不同深度的岩石圈密度分布, 可知其深部密度结构已趋于完整, 所显示的高密度异常具有自南向北、自东向西加深的迹象. 为了进一步剖析该区域的岩石圈密度结构, 笔者从三维密度成像结果中截取了 3 条典型剖面(图 4), 分析西准噶尔及周边的岩石圈密度结构特征及其构造含义.

AA'剖面(图 4a)横跨区内阿尔泰、哈萨克斯坦—准噶尔、天山与塔里木这 4 个构造单元, 其密度异常具有如下特征:

(1) 准噶尔盆地北段(200~360 km; 图 4a)以中、下地壳—上地幔密度高为主要特征, 高密度体具有向北下插的趋势, 笔者推测古洋板片有可能向北俯冲至阿尔泰陆缘岩石圈之下. 而该段北部的阿尔泰褶皱带南缘为额尔齐斯增生杂岩带(Xiao *et al.*, 2008; 高睿等, 2013), 此处(160~230 km)的岩石圈高密度带可能对应俯冲带北缘富含幔源物质的增生杂岩体. 增生杂岩带南侧的中、上地壳低密度异常则可能是陆缘沉积凹陷的体现.

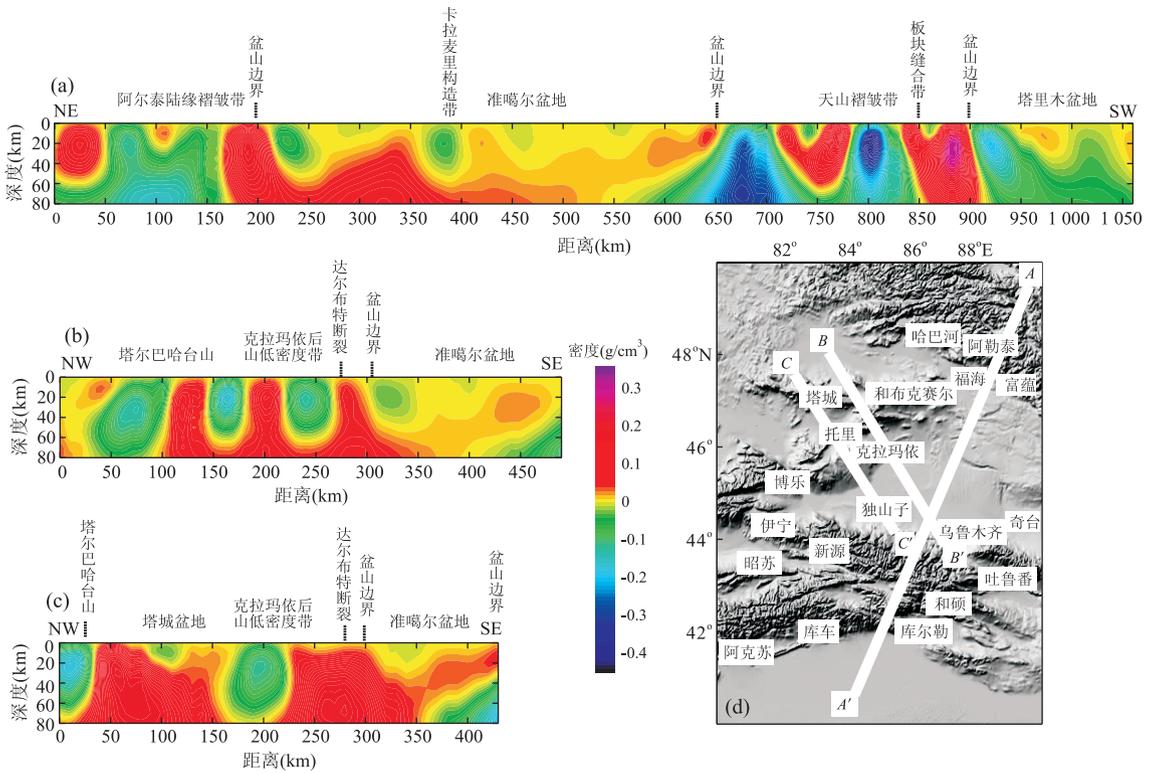


图 4 3 条典型剖面的岩石圈密度异常结构

Fig. 4 Three typical cross-sections of lithospheric anomalous density structure

a. AA'剖面密度异常; b. BB'剖面密度异常; c. CC'剖面密度异常; d. 各条剖面的地理位置

(2)准噶尔盆地南段(360~650 km;图 4a)与其北段岩石圈密度有类似的特征,该段北端的低密度异常位于卡拉麦里构造带的西部延伸段上,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(李锦轶等, 1990; 肖序常等, 1992). 本段地壳—上地幔密度高异常向南延至北天山一带,若此高密度体为古准噶尔洋盆岩石圈的反映,则表明哈萨克斯坦板块向北俯冲至西伯利亚板块之下(刘希军等, 2007). 本段的壳幔密度结构显示,在印度板块与欧亚板块碰撞过程中,准噶尔地块岩石圈相对坚硬,保持了相对完整的结构.

(3)在天山褶皱带—塔里木盆地边缘段(650~1 060 km;图 4a),天山褶皱带密度结构复杂,显示了在南北两侧的推挤下,地壳与岩石圈发生了褶皱、断裂、重叠和斜插过程. 天山造山带地壳在垂直山体走向的方向上具有明显的分块特征,在不同块体的分界部位,壳幔发生了明显断错. 密度反演结果与郭颀等(2006)利用天然地震对波速成像的结果(0~100 km范围)十分相似,高速带对应高密度带,低速带对应低密度带. 天山与两侧盆地深部结构明显不同,深部地壳与上地幔均具有低密度异常并且向两

侧盆地内部延伸.

BB'和 CC'剖面(图 4b 和 4c)是两条横穿西准噶尔构造带的剖面. BB'剖面穿过塔尔巴哈台山东南端和乌鲁木齐至天山以北的呼图壁附近,并穿过准噶尔盆地西部;CC'剖面与 BB'剖面平行,穿过塔尔巴哈台山、玛依力山、准噶尔盆地西南部和奎屯至天山北麓. 两条剖面上的密度异常均显示准噶尔盆地存在壳幔高密度体,且由 SE 向 NW 下插,在达尔布特断裂带附近,存在壳幔高密度体聚集. 根据出露于该区段的蛇绿混杂岩研究,高睿等(2013)认为达尔布特蛇绿岩产生的构造环境为洋壳俯冲,高密度异常则有可能是俯冲增生楔的显示,与 BB'和 CC'两条剖面给出的密度异常相契合.

在 BB'剖面的地壳范围内,克拉玛依后山高密度带西北面仍然存在两个高密度异常区,分别对应于铁厂沟—和布克赛尔带和额敏—乌鲁木齐高密度带,两者在上地幔连成一体,这是否与俯冲带岛弧有关尚有待证实. Xiao *et al.* (2008)对该区带上的蛇绿混杂岩年代学研究表明,位于唐巴勒和玛依勒蛇绿混杂岩相比达尔布特和克拉玛依蛇绿混杂岩略早(约 100 Ma),说明此处板块碰撞活动具有多期次

与多形式特征。

在克拉玛依后山以及塔城盆地地段, BB' 和 CC' 剖面均显示存在低密度异常. 在达尔布特两侧, 出露的大片花岗岩体(如庙尔沟岩体、阿巴克斯套岩体、克拉玛依—夏尔浦岩体、红山岩体等)表明克拉玛依后山地段中、上地壳存在大量硅铝质成分物质, 而塔城盆地的低密度异常则可能是由较厚的中生代沉积物所致。

总体上, 准噶尔盆地区域岩石圈相对完整的高密度结构反映了其岩石圈较为坚硬的特征, 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, 其岩石圈具有较厚的有效弹性厚度(Chen *et al.*, 2013), 表明自古生代以来, 其壳幔结构保留较为完整, 而岩石圈密度结构并未显示准噶尔盆地岩石圈向天山之下俯冲的迹象. 根据近年来卫星磁异常的研究, 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(杜劲松, 2014), 这些是否说明形成于早古生代准噶尔洋的岩石圈虽然经历了后期的变动和破坏, 但是仍然保留了相对完整的古洋盆岩石圈?

4 结论

本文利用最新的卫星重力模型, 通过计算得到西准噶尔及其周边地区的布格重力异常, 进而采用现代三维反演技术, 对西准噶尔及其周边地区的地壳与上地幔顶部进行密度成像, 得到了 0~80 km 深度范围内的密度结构。

在阿尔泰、哈萨克斯坦—准噶尔和天山这 3 个主要构造单元地区, 其岩石圈密度变化特点可以归纳如下:

(1) 地壳密度变化显示了 3 个构造单元的不同构造属性. 阿尔泰褶皱带上的“断块”式的密度结构, 反映了古大陆陆缘挤压、拉张及形变的构造特征; 哈萨克斯坦—准噶尔构造单元内具有明显的东、西分带特征, 盆地腹部密度结构相对完整, 哈萨克斯坦—西准噶尔区域则表现出与准噶尔洋壳俯冲相关的密度结构; 天山褶皱带具有典型造山带的“支离破碎”结构特征, 密度异常的展布方向与构造走向密切相关。

(2) 上地幔顶部密度变化进一步展示了 3 个构造单元的岩石圈背景特征. 阿尔泰褶皱带的相对低密度是由于古大陆巨厚的硅铝层所致; 哈萨克斯

坦—准噶尔盆地相对完整的高密度结构显示了其自晚古生代以来稳定且坚硬的性质; 天山褶皱带上剧烈密度变化描绘了超岩石圈断裂对岩石圈的切割以及岩石圈形变与构造活动的痕迹。

(3) 地壳—上地幔顶部的密度结构反映了区域断裂构造及其深部延伸特征. 区内多数区域大断裂与密度变化分界线对应, 尤其在天山造山带中几条主干断裂与密度异常的突变带十分吻合; 前人提出中国境内的哈萨克斯坦板块南北缝合线也与密度异常变化带基本对应。

(4) 壳幔密度异常显示, 坚硬的古准噶尔洋壳有可能向 NE、NW 分别俯冲于西伯利亚板块和西准噶尔地块之下。

综上所述, 本文提出的研究区三维密度结构, 定量地解释了该地区的区域重力异常成因, 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: 两位匿名审稿人为提高论文质量提出了建设性的修改意见, 在此表示由衷感谢!

References

- Ai, K. K., Ji, L. J., 2015. Tectonic Rplift of Mountains in Northwestern Junggar since Late Cenozoic: Evidences from Sedimentology and Magnetic Fabric in Heshituoluogai Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(3): 535—547 (in Chinese with English abstract).
- Bai, W. J., Yang, J. S., 1985. On Continental Basin-Mountain Tectonic Framework and Continental Basin Spreading. *Journal of Changchun College of Geology*, (4): 21—28 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Arakawa, Y., 2005. Elemental and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of Granitoids from the West Junggar Foldbelt (NW China), with Implications for Phanerozoic Continental Growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1307—1320. doi: 10. 1016/j. gca. 2004. 09. 019
- 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
- Chen, B., Jahn, B. M., 2004. Genesis of Post-Collisional Granitoids and Basement Nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr Isotope and Trace Element Evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691—

703. doi:10.1016/s1367-9120(03)00118-4
- Chen, J. F., Han, B. F., Zhang, L., 2010. Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Tectonic Implications of Two Generations of Late Paleozoic Plutons in Northern West Junggar, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2317—2335 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S., Guo, Z. J., 2010. Time Constraints, Tectonic Setting of Dalabute Ophiolitic Complex and Its Significance for Late Paleozoic Tectonic Evolution in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2336—2344 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S. D., Wang, G. R., Yang, S. D., et al., 1986. The Paleoplate Tectonic of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 4(2): 1—26 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. Q., Shen, Y. H., Zhang, L. C., et al., 1995. Tectonic Constitution and Evolution of the Chinese Continent. *Regional Geology of China*, (4): 289—294 (in Chinese with English abstract).
- Coleman, R. G., 1989. Continental Growth of Northwest China. *Tectonics*, 8(3): 621—635. doi: 10.1029/tc008i003p00621
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Fang, J., 2006. Isostatic Gravity Anomaly and Its Geodynamic Characters in China and Its Adjacent Regions. Postdoctoral Research Report, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (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
- Feng, Y. M., 1986. Types of Ophiolites in West Junggar. *Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci.*, (13): 37—45 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Geng, H. Y., Sun, M., Yuan, C., et al., 2009. Geochemical, Sr-Nd and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Studies of Late Carboniferous Magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for Ridge Subduction? *Chemical Geology*, 266(3—4): 364—389. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.07.001
- Guo, B., Liu, Q. Y., Chen, J. H., et al., 2006. Seismic Tomography of the Crust and Upper Mantle Structure Underneath the Chinese Tianshan. *Chinese J. Geophys.*, 49(6): 1693—1700 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., Ji, J. Q., Song, B., et al., 2006. Late Paleozoic Vertical Growth of Continental Crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of Post-Collisional Plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Li, M. S., Liu, D. Q., 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Xinjiang People's Publishing House, Urumqi (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Liu, J. B., Zhang, Y. Q., et al., 2007. Keramay Ophiolitic Mélange Formed during Earth Paleozoic in Western Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1573—1576 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. Q., Jahn, B. M., Zhang, G. X., et al., 2000. Crustal Evolution and Phanerozoic Crustal Growth in Northern Xinjiang: Nd Isotopic Evidence. Part I. Isotopic Characterization of Basement Rocks. *Tectonophysics*, 328(1—2): 15—51. doi: 10.1016/s0040-1951(00)00176-1
- 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, 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, Y. G., Oldenburg, D. W., 1998. 3-D Inversion of Gravity Data. *Geophysics*, 63(1): 109—119. doi: 10.1190/1.1444302
- Liu, X. J., Xu, J. F., Hou, Q. Y., et al., 2007. Geochemical Characteristic of Karamaili Ophiolite in East Junggar, Xinjiang: Products of Ridge Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1591—1602 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C., Xiao, W. J., Windley, B. F., et al., 2012. Tracing a Subducted Ridge-Transform System in a Late Carboniferous Accretionary Prism of the Southern Altaids: Orthogonal Sanukitoid Dyke Swarms in Western

- Junggar, NW China. *Lithos*, 140—141; 152—165. doi: 10.1016/j.lithos.2012.02.005
- Qiu, R. Z., Li, W. Y., Zhou, S., et al., 2008. Lithospheric Types, Petrological Structures and Their Implications in Northwestern China Continent. *Northwestern Geology*, 41(2): 1—21 (in Chinese with English abstract).
- Şengör, A. M. C., Natalin, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299—307. doi: 10.1038/364299a0
- Shako, R., Fste, 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.
- Tang, G. J., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2010. Ridge Subduction and Crustal Growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous Adakites and High-Mg Diorites in the Western Junggar Region, Northern Xinjiang (West China). *Chemical Geology*, 277(3—4): 281—300. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.08.012
- Tang, G. J., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2012a. Recycling Oceanic Crust for Continental Crustal Growth: Sr-Nd-Hf Isotope Evidence from Granitoids in the Western Junggar Region, NW China. *Lithos*, 128—131; 73—83. doi: 10.1016/j.lithos.2011.11.003
- Tang, G. J., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2012b. Late Carboniferous High $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ Granitoids, Enclaves and Dikes in Western Junggar, NW China: Ridge-Subduction-Related Magmatism and Crustal Growth. *Lithos*, 140—141; 86—102. doi: 10.1016/j.lithos.2012.01.025
- Tong, Y., Wang, T., Hong, D. W., et al., 2010. Spatial and Temporal Distribution of the Carboniferous-Permian Granitoids in Northern Xinjiang and Its Adjacent Areas, and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619—641 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Windley, B., Kröner, A., Guo, J. H., et al., 2002. Neoproterozoic to Paleozoic Geology of the Altai Orogen, NW China: New Zircon Age Data and Tectonic Evolution. *The Journal of Geology*, 110(6): 719—737. doi: 10.1086/342866
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2008. Middle Cambrian to Permian Subduction-Related Accretionary Orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the Tectonic Evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2—4): 102—117. doi: 10.1016/j.jseas.2007.10.008
- Xiao, W. J., Kusky, T. M., 2009. Geodynamic Processes and Metallogenesis of the Central Asian and Related Orogenic Belts: Introduction. *Gondwana Research*, 16(2): 167—169. doi: 10.1016/j.gr.2009.05.001
- Xiao, W. J., Zhang, L. C., Qin, K. Z., et al., 2004. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370—395. doi: 10.2475/ajs.304.4.370
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., et al., 1992. *The Tectonism of Northern Xinjiang and Its Adjacent Region*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xiong, X. S., 2010. *Moho Depth and Variation of the Continent in China and Its Geodynamic Implications* (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (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—133; 141—161. doi: 10.1016/j.lithos.2011.11.016
- Yang, G. X., Li, Y. J., Gu, P. Y., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Study of the Darbut Ophiolitic Complex in the West Junggar (NW China): Implications for Petrogenesis and Tectonic Evolution. *Gondwana Research*, 21(4): 1037—1049. doi: 10.1016/j.gr.2011.07.029
- 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—2): 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, L. F., Ai, Y. L., Li, X. P., et al., 2007. Triassic Collision of Western Tianshan Orogenic Belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from HP/UHP Eclogitic Rocks. *Lithos*, 96(1-2): 266—280. doi:

10.1016/j.lithos.2006.09.012

Zhang, X. K., Qu, G. S., Zhao J. R., 2008. Seismic Detection of Deep Structures in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(6): 675—679 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. M., Liou, J. G., Coleman, R. G., 1984. An Outline of the Plate Tectonics of China. *Geological Society of America Bulletin*, 95(3): 295—312. doi: 10.1130/0016-7606(1984)95<295:aoopt>2.0.co;2

Zhou, J., Ji, J. Q., Han, B. F., et al., 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Mafic Dykes in North Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 997—1010 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

艾可可, 季军良, 2015. 准噶尔西北部山地晚新生代以来隆升过程: 来自沉积学和磁组构的证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(3): 535—547.

白文吉, 杨经绥, 1985. 论大陆盆—山构造格局、盆地扩张及其形成机制. *长春地质学院学报*, (4): 21—28.

陈家富, 韩宝福, 张磊, 2010. 西准噶尔北部晚古生代两期侵入岩的地球化学 Sr—Nd 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2317—2335.

陈石, 郭召杰, 2010. 达拉布特蛇绿岩带的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论. *岩石学报*, 26(8): 2336—2344.

成守德, 王广瑞, 杨树德, 等, 1986. 新疆古板块构造. *新疆地质*, 4(2): 1—26.

程裕淇, 沈永和, 张良臣, 等, 1995. 中国大陆的地质构造演化. *中国区域地质*, (4): 289—294.

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.

方剑, 2006. 中国及邻区均衡重力异常及其地球动力学特征. 博士后研究报告, 北京: 中国地震局地质研究所.

冯益民, 1986. 西准噶尔蛇绿岩生成环境及其成因类型. *中国*

地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (13): 37—45.

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.

郭颺, 刘启元, 陈九辉, 等, 2006. 中国境内天山地区地幔结构的地震层析成像. *地球物理学报*, 49(6): 1693—1700.

韩宝福, 季建清, 宋彪, 等, 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)-后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077—1086.

何国琦, 李茂松, 刘德权, 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.

何国琦, 刘建波, 张越迁, 等, 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. *岩石学报*, 23(7): 1573—1576.

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.

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.

邱瑞照, 李文渊, 周肃, 等, 2008. 中国西北大陆岩石圈类型、岩石学结构及其意义. *西北地质*, 41(2): 1—21.

童英, 王涛, 洪大卫, 等, 2010. 北疆及邻区石炭—二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 619—641.

肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等, 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社.

熊小松, 2010. 中国大陆莫霍面深度与变化特征及其地球动力学意义(博士学位论文), 北京: 中国地质科学院.

张先康, 曲国胜, 赵金仁, 2008. 准噶尔盆地深部构造人工地震探测. *新疆石油地质*, 29(6): 675—679.

周晶, 季建清, 韩宝福, 等, 2008. 新疆北部基性岩脉 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究. *岩石学报*, 24(5): 997—1010.