https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.434



塔里木盆地东北部磁性基底深度及构造属性

匡星涛,宁方馨,肖梦楚,朱晓颖*,徐 曦

中国自然资源航空物探遥感中心,北京100083

摘 要:为了探讨塔里木盆地东北部磁性基底深度、性质及其对构造属性的指示意义,基于最新的高精度航磁数据,利用剖面 切线法计算了塔里木盆地东北部磁性体最小埋深,并绘制了磁性基底深度图.结果显示,大部分地区的磁性基底深度与勘探地 震的沉积盖层底界深度相差不大,表明切线法计算结果具有很高的可信度.但是在塔东隆起北缘,磁性基底起伏较大,与沉积 盖层底界深度差异明显.在分析磁性基底深度图的基础上,结合高精度布格重力异常以及地震解释剖面,探讨了塔东隆起和孔 雀河斜坡的构造属性.研究认为,塔东隆起北缘显著的长波磁异常梯度带和较低的重力值,剧烈变化的磁性基底深度,以及大 量钻遇的古元古代变质花岗岩,均指示塔东隆起可能是塔里木盆地东北部最重要的前寒武纪构造边界.孔雀河斜坡重磁异常 呈现明显的负相关性,基于磁性基底、南华系一震旦系沉积厚度等与重磁异常的空间结构关系,以及岩石磁性特征等,认为新 元古代的裂谷作用可能降低了基底磁性,而北部凹陷中南部未受裂谷作用影响,依然保留了强磁性特征.

中图分类号: P318 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1351-15 **收稿日期:** 2022-05-31

Depth and Tectonic Properties of Magnetic Basement in Northeastern Tarim Basin

Kuang Xingtao, Ning Fangxin, Xiao Mengchu, Zhu Xiaoying*, Xu Xi

China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China

Abstract: In order to explore the depth and properties of magnetic basement in northeastern Tarim basin and its indication for tectonic attributes, based on the latest high-precision aeromagnetic data, the minimum buried depth of magnetic body in northeastern Tarim basin was calculated by using section tangent method, and the magnetic basement depth map was drawn. The results show that the depth of magnetic basement in most areas of northeastern Tarim basin is approximate to the depth of bottom boundary of sedimentary cover in seismic exploration, indicating that the calculation results of tangent method have high reliability. However, in the northern edge of Tadong uplift, the magnetic basement fluctuates greatly, and the depth is obviously different from that of sedimentary cover layer. Based on the analysis of the magnetic basement depth map, combining the high-precision Bouguer gravity anomaly and seismic interpretation profile, the tectonic attributes of the Tadong uplift and Kongquehe slope are interpreted. The obviously long-wave magnetic anomaly gradient zone, the low gravity, the highly variable magnetic basement depth, combining a large number of the Paleoproterozoic metamorphic granite samples in borehole, indicate that Tadong uplift may be the most important Precambrian structural boundary. The gravity and magnetic anomalies in Kongquehe slope show

引用格式: 匡星涛, 宁方馨, 肖梦楚, 朱晓颖, 徐曦, 2023. 塔里木盆地东北部磁性基底深度及构造属性. 地球科学, 48(4): 1351-1365.

Citation: Kuang Xingtao, Ning Fangxin, Xiao Mengchu, Zhu Xiaoying, Xu Xi, 2023. Depth and Tectonic Properties of Magnetic Basement in Northeastern Tarim Basin. *Earth Science*, 48(4):1351-1365.

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.DD20160065, DD20190025).

作者简介: E 星涛(1988-), 男, 工程师, 主要从事航空重磁数据处理、解释以及构造地质研究工作. ORCID: 0000-0002-9805-9363. E-mail: kuangxingtao@126. com

^{*}通讯作者:朱晓颖, E-mail: zhu_xiaoyin@163.com

obviously negative correlation. Based on the spatial structure relations of magnetic basement, the Nanhua-Sinian sedimentary thickness and gravity-magnetic anomalies, and the magnetic characteristics of the rock, etc., in this study it suggests that the Neoproterozoic rift event may reduce the magnetism of the basement, on the contrary, the crust of the central and southern region of northern depression which was not affected by the rifting, still retains the strong magnetic characteristics.

Key words: aeromagnetic anomalies; magnetic basement; Tadong uplift; tectonic boundary; Kongquehe slope; Neoproterozoic rift.

前寒武纪克拉通结晶基底属性不仅是大陆形 成和演化研究的重要内容(Hawkesworth and Kemp, 2006; 刘平华等, 2020), 而且是能源和资源 勘探的重要基础(胡国泽等, 2014).塔里木盆地作 为中国最大的陆内海一陆相叠合盆地,蕴含着丰富 的油气资源,其变质基底经历了从太古宙到新生代 漫长的地质演化过程(Wu et al., 2018; Laborde et al., 2019; 辜平阳等, 2020; 李祥权等, 2021). 前 人对于塔里木盆地的结晶基底性质和构造演化进 行了全面深入的研究,取得了重要进展(朱文斌等, 2018; 舒良树等, 2019; Wang et al., 2020). 但由于 塔里木克拉通的前寒武基底仅在盆地周缘造山带 例如库鲁克塔格和阿尔金山北坡等地局部出露(Xu et al., 2013; Wang et al., 2020), 对于塔里木盆地 内部基底结构和性质无法通过野外地质露头进行 直接研究.此外,前人主要基于零星岩石样品进行 地球化学和岩石学等研究,难以对塔里木盆地结晶 基底进行宏观的整体研究.前寒武纪结晶基底与沉 积盖层之间具有显著的磁性差异,这为航磁资料研 究塔里木盆地磁性结晶基底深度和性质等地质问 题提供了重要且基础的岩石物性条件(熊盛青等, 2014).前人已使用重力探测、航空磁测、勘探地震等 手段分别研究了塔里木盆地的基底深度、基底断裂 分布等重要参数(杨文采等, 2012; Lin et al., 2015; Laborde et al., 2019; Xu et al., 2021a; Kuang et al., 2022),且通过地质填图、物性统计分 析等手段揭示塔里木盆地的基底由多种不同时代 的岩石组成,例如新太古代一古元古代或更老年龄 的托格拉克布拉克杂岩及中元古代一新元古代早 期兴地塔格群(Lu et al., 2008).但上述研究一方 面对于磁性基底的深度缺乏定量计算(徐鸣洁等, 2005),另一方面采用了粗略的计算方法(杨文采 等,2012).磁性基底深度及其变化对于前寒武纪沉 积层厚度、结晶基底性质、区域地质演化研究等均 具有重要实际意义,因此本文基于最新的高精度大 比例尺航磁数据,采用成熟稳定的定量计算 方法——切线法(Xiong et al., 2016; Tong et al., 2018)对塔里木盆地东部的磁性基底深度进行计 算,结合勘探地震约束,解析塔里木盆地前寒武纪 结晶基底性质和地质属性,为塔里木盆地地壳物质 组成和克拉通形成演化提供新的研究视角.

1 区域地质背景

塔里木盆地位于中国新疆自治区南部,面积达 56万km²,平面形态近似为菱形,其北部是天山和北山,南部是西昆仑山和阿尔金山,图1展示了塔里木 盆地东部地区的盆山边界和研究区范围.塔里木盆 地基底经历了太古宙原始大陆核形成和演化阶段 (Long et al., 2011),古元古代末期及中元古代晚期 到新元古代早期的造山事件(Guo et al., 2005; Zhang et al., 2012; Xu et al., 2013; Zhao et al., 2021),显生宙地幔柱改造事件(Xu et al., 2021b)等 重要演化阶段.

塔里木盆地的前寒武纪基底仅在盆地周缘出 露,主要分布在库鲁克塔格、阿尔金、阿克苏一柯 坪、西昆仑-铁克里克地区(王向利等, 2010).太古 宇地层主要出露在塔里木盆地北部库鲁克塔格地 区和阿尔金山地区,主要岩性为深变质的角闪岩、 片麻岩和麻粒岩,库鲁克塔格发现3263±129 Ma 的太古宇角闪岩(胡霭琴和格雷姆·罗杰斯, 1992), 阿尔金北坡目前发现的最老的地层年龄为3574~ 3 665 Ma(郭召杰等, 2003). 早元古代变质岩原岩 以活动陆缘沉积岩为主(邬光辉等, 2012),早元古 代地层在库鲁克塔格地区为一套巨厚的陆源碎屑 岩和碳酸盐岩变质而成的低绿片岩相和低角闪岩 相,阿尔金地区为一套碎屑岩、碳酸盐岩和火山岩 变质而成的片麻岩、混合岩和角闪岩(贾承造, 1997).中元古代和新元古代露头分布较为广泛,以 浅海陆源碎屑岩、碳酸盐岩、火山碎屑岩形成的 中一浅变质岩为主(邬光辉等, 2012).

南华系-震旦系在前南华纪变质基底之上发 育巨厚的大陆裂谷沉积建造,局部发育冰碛岩(何 碧竹等,2019).塔里木盆地南华纪到下二叠统为海 相一海陆交互相沉积,上二叠统到第四系为陆相沉 积,沉积最大残余厚度超过15000m,累积最大沉积



蓝色线框为航磁测量区;黑色虚线为盆地内构造边界; D1. 库鲁克塔格; D2. 孔雀河斜坡; D3. 满加尔凹陷; D4. 英吉苏凹陷; D5塔东隆起;

D6.东南凹陷;F1.车尔臣断裂;F2.孔雀河断裂

厚度超过25000m(金之钧等,2005).除前南华纪 基底,塔里木盆地沉积层在纵向上可以分为南华 系一震旦系裂谷盆地、寒武系一奥陶系海相碳酸盐 岩台地、志留系一白垩系碎屑岩坳陷及新生界前陆 盆地等四大构造层(邬光辉等,2021).

2 磁异常数据与地震数据

2.1 航磁数据及特征

航磁资料来源于中国自然资源航空物探遥感 中心2015—2016年获得的最新实测数据.航磁测量 使用的磁力仪是高精度的HC-2000氦光泵磁力仪; 测量使用的飞机是固定翼Cessna208B机型;飞机平 均离地飞行高度约为666.5m;测线方向为南北向, 大致与区域构造走向垂直,测线间距为0.5km; 切割线方向为东西向,间距为10 km;测线总长度为 75 427.4 km;覆盖面积约为39 337.3 km²(图1).

野外采集的航磁数据采用中国自然资源航空 物探遥感中心自行研发的地球物理处理软件Geoprobe 2.0 Software进行质量控制和转换处理,关键 环节包括仪器稳定性检测,磁四阶差分统计,磁日 变校正,坐标转换,正常地磁场计算和校正,切割线 调平,网格化等.为了减小平均地磁场参数的影响, 还进行了全变倾角化极处理(Arkani-Hamed, 1988),最终得到了航磁化极结果(图2a)所示;同时 为了有效突出与磁性基底有关的长波长信号,对航 磁化极数据进行了上延10 km处理(图2b).

研究区航磁总体以NEE和NE向异常为主,仅 在库鲁克塔格区呈现一定的NWW向磁异常.库鲁



克塔格磁异常区在研究区范围内面积较小,以负背 景磁场上发育一系列局部异常区别于孔雀河斜坡 的磁场特征,依据以往航磁资料研究成果来看,该 磁场区向东西两侧及向北延伸很远,在大范围内呈 现东西向延伸的平缓负异常区,局部异常发育,磁 场强度在-300~200 nT之间.孔雀河斜坡磁异常 区以北东向中等到弱磁异常为主,在上延10 km 航 磁图上比较明显.孔雀河斜坡区的长波磁异常的走 向与孔雀河斜坡的寒武系底界构造走向呈一定的 交角,可能代表着寒武纪前后该区构造作用方向发 生了转变.北部凹陷,包括满加尔凹陷和英吉苏凹 陷,该区中南部发育有大幅度长波长的正磁异常, 属于塔中纬向高磁异常带的一部分,在化极磁场上 和上延10 km 磁场上均有十分明显的特征.塔北凹 陷的北部与孔雀河斜坡之间并无明显的磁场梯度 带,说明前寒武纪塔北凹陷北部与孔雀河斜坡可能 经历了相似的演化历程.塔东隆起的磁异常具有研 究区最大最陡的磁异常梯度,沿北西向南东,在 50 km范围内磁异常下降幅度可超过300 nT,在上 延10 km航磁图上仍然表现出类似特征,这表明塔 东隆起带可能是一个重要的构造边界.东南凹陷以 车尔臣断裂为界与塔东隆起相连,但该边界及附近 无论是在化极磁场图上还是上延10 km磁场图上, 均表现为研究区内最大的负值异常区,并无显著的 梯度特征,该负值异常区以南,出现许多团块状的 中等幅度的磁异常,具有岩浆岩成因特征.

2.2 沉积层底界深度和厚度资料

新生界底面深度、中生界底面深度和古生界底



Fig.3 Phanerozoic stratigraphic depth in the northeastern Tarim basin

面深度(图3)来自中石油东方地球物理公司研究院 库尔勒分院.震旦系厚度和南华系厚度(图4)来自 中国石油勘探开发研究院的研究成果(任荣等, 2017).

3 磁化率特征

显生宙地层磁化率资料主要来自东方地球物 理公司研究院库尔勒分院提供的塔里木盆地东部 地区钻井地层磁化率数据;变质基底和火成岩的磁 化率资料主要来自中国自然资源航空物探遥感中 心 2015—2016年野外工作组在塔里木盆地东部周 缘造山带,例如库鲁克塔格、天山、阿尔金山和昆仑 山等地的实测数据.经过统计整理上述资料,得到 表1.塔里木盆地东部震旦系至古生界,主要岩性为 灰岩、砂岩、泥岩、砾岩等,中一新生界地层主要的 岩性为砂岩、泥岩、砾岩等,中一新生界地层主要的 岩性为砂岩、泥岩、砂泥岩.新生界、中生界、古生界 地层的平均磁化率值分别不超过50×10⁻⁵ SI、20× 10⁻⁵ SI和40×10⁻⁵ SI.元古宇常见的岩性为大理 岩、片岩、硅质岩、麻粒岩、石英岩、板岩和少量的片 麻岩等,虽然片麻岩的磁化率可达17700×10⁻⁵ SI,但元古宇岩石的磁化率一般不超过1000×10⁻⁵ SI,平均值仅为28×10⁻⁵ SI.研究区磁化率最大的 地层来自太古宇,平均磁化率可达2300×10⁻⁵ SI.

研究区太古宇地层的主要露头位于盆地北缘的库鲁克塔格和阿尔金山北坡.库鲁克塔格地区的托格拉克布拉克杂岩(Ar₂tg)主要由中高级变质岩系组成,主要岩性包括混合岩,平均磁化率为100×10⁻⁵ SI;斜长花岗片麻岩,平均磁化率为600×10⁻⁵ SI;黑云母角闪斜长片麻岩,平均磁化率为400×10⁻⁵ SI;还有在蛭石矿区发现的大量金云母岩、透辉石岩、碳酸岩,其平均磁化率可达4000×10⁻⁵ SI.阿尔金山北坡的米兰岩群(Ar₂ml)主要包括麻粒岩和斜长角闪岩,平均磁化率均为1500×10⁻⁵ SI.左右.

研究区周缘造山带元古宇和古生代均有岩浆 岩出露,岩浆岩的磁化率大小与二氧化硅含量具有 明显的相关性,大致按照基性、中性和酸性,岩石的 磁化率逐渐降低.基性一超基性岩浆岩的磁化率可 达7000×10⁻⁵ SI,但广泛分布的中性和酸性岩浆岩



Fig.4 Thickness maps of Sinian System (a) and Nanhua System (b) in the northeastern Tarim basin

的磁化率平均值分别为280×10⁻⁵ SI和60×10⁻⁵ SI 左右(表2).

综上所述,几乎所有的显生宙地层的磁化率均 为低值,不能引起明显的磁异常;元古宇的磁化率 总体为低值,但是有少量的片麻岩等强磁性变质 岩,可以引起高磁异常;岩浆岩的磁化率变化范围 非常大,虽然有很强的磁性基性一超基性岩石分 布,但是中等到弱磁性的中酸性岩分布范围要广泛 得多.因此,区域上具有强磁性的岩石主要是太古 宇变质岩.

4 磁性基底深度计算

4.1 磁性基底深度计算方法

磁源深度计算方法主要有两类.第一类是磁异 常拟合法,通过反演场源物性(Portniaguine and Zhdanov, 2002)或几何参数(Barnett, 1976),通过选 择最终反演的物性阈值或得到的几何参数来获取 深度信息.此类方法不易使用先验信息,多解性较 强.第二类是无需考虑场源具体形态和物性大小, 直接求取场源深度的方法,此类方法并不直接拟合 磁异常,例如功率谱法(Spector and Grant, 1970)、 werner反褶积法(Ku and Sharp, 1983)、解析信号法

Table 1Magnetic susceptibility of strata in northeast Tarim basin and its periphery								
时代	14 IA.	磁化率(10 ⁻⁵ SI)						
	石住	测点数	最小值	最大值	平均值			
Q	砂岩、碎石、黄土	635	0	278	47			
Ν	砂岩、泥岩、砂页岩	112	0	180	33			
Е	砂岩、泥岩、砂页岩	52	0	30	8			
К	砂岩	148	0	270	12			
J	砂岩、泥岩、砾岩	930	0	110	15			
С	砂岩、灰岩、泥岩、火山角砾岩、火山碎屑岩	237	0	1 400	40			
D	灰岩、硅质岩、砂岩	105	0	109	5			
S	灰岩、砂岩、硅质岩、火山碎屑岩	77	0	45	8			
О	砂岩、泥岩、灰岩、白云岩	215	0	81	13			
E	灰岩	17	0	26	1			
Ζ	砂岩、砾岩、冰碛岩	139	0	75	21			
Pt	片岩、片麻岩、大理岩、板岩、石英岩	1 100	0	17 710	28			
Ar	碳酸岩、金云母岩、片麻岩、透辉石岩、麻粒岩	252	18	25 600	2 294			

表1 塔里木盆地东北部及周缘地层磁化率

表2 塔里木盆地东北部及周缘侵入岩磁化率

Table 2	Magnetic susceptibility	of intrusive rocks in	northeastern Tari	m basin and its periphery

브써	磁化率(10 ⁻⁵ SI)			
石比	测点数	最小值	最大值	平均值
片麻状花岗岩、花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、混合花岗岩	435	0	1 000	60
闪长岩、安山岩、闪长玢岩	132	10	4 900	281
辉绿岩、超基性岩	49	140	27 900	7 065

(Nabighian, 1974),以及切线法(Vacquier *et al.*, 1951; Tong *et al.*, 2018)等.其中切线法相较于其他非拟合类方法具有更好的人机交互特征,便于使用先验信息约束计算结果,具有速度快和精度高等优点(熊盛青等,2014; Tong *et al.*, 2018).

决定磁异常形态的主要因素有两个:一是磁性体的磁化特征,二是磁性体空间赋存状态.不同的 磁性体可以引起形态特征相同的磁异常,造成反演 多解性.因此,各种反演计算方法都是在一定的假 设条件下提出来的.切线法也是这样,它是假设磁 性体为磁性均匀的二度厚板状体,剖面方向与板状 体走向大致垂直的条件下提出来的(Vacquier et al., 1951;Gay, 1963).郭志宏等(2003)详细介绍 了切线法计算磁性基底深度的公式及方法技术流 程,黄旭钊等(2007)成功研制了交互式航磁异常切 线法软件系统,模型试验表明磁性基底深度计算误 差小于10%.实际应用中,为了消除斜磁化对磁性 体位置判定的影响,使用航磁化极场进行深度计算. 同时为了满足二度板状体的假设,ΔT剖面磁异常 应尽量与构造走向垂直,以保证更高的可信度.切 线法在实际应用中取得了很好的效果,经过与地震 和钻井资料的对比,切线法深度统计误差一般不超 过20%(熊盛青等,2014;Tong et al., 2018).对于塔 里木盆地东部的实际地质情况而言,无论是磁场面 貌(图2),还是勘探地震(图3,图4),均表明塔里木 盆地东部具有南北分块的特征,即地质构造边界主 要是东西向、北东向和北西西向,尤其是构造分区, 具有总体沿东西向展布的特点(图1),大致符合二 度半板状体的要求.杨文采等(2012)采用欧拉反褶 积计算塔里木盆地磁性基底深度时,通过不同的构 造指数试验与地震、重力资料所获得基底埋深对 比,最终选择磁性体构造指数为1,即认为磁性基底 符合二度半体的岩墙假设,这与切线法的适用条件 是一致的.

4.2 磁性基底深度编图方法

切线法计算得到的深度为磁性体最小埋深,因 此需要首先编制磁性体最小深度图,然后再结合地 质资料编制磁性基底深度图.

4.2.1 磁性体最小深度图的编制本区磁性体最小埋藏深度图是以切线法计算的深度值为主要依

据,综合考虑本地区地质、地球物理资料而编制的. 在编图过程中遵循了以下几条原则:

(1)对计算的深度值进行认真检查,将与实际 情况不符或在同一异常带上相邻测线深度变化较 大的深度点予以重算或删除,从而减少深度的偶然 误差,保证深度值的质量.

(2)不同规模的磁异常往往反映着地下不同的 磁性层,根据磁异常形态及其深度大小将反映磁性 基岩的深度与沉积层磁性体的深度区分开来,在勾 深度图时分别进行处理.

(3)最小埋藏深度图上的基岩深度以区域等深 线形式体现.根据基岩深度大小及其磁异常带的梯 度、规模、方向变化确定等深线的走向,由浅入深内 插等深线.

根据以上原则,勾绘出了塔里木盆地东北部地区的磁性体最小埋藏深度图,如图 5a 所示.

最小埋藏深度图是各地质时代具磁性岩石顶 面深度的综合反映,它给出了一个综合的、笼统的 地质信息,因此,分析测区各地层的磁性特征,进而 对深度图作必要的地质解释是至关重要的.

由该区岩石物性统计结果来看,测区内磁性层 较多,既有前南华系结晶基岩的区域磁性层,又有 岩浆岩的局部磁性层.在这些磁性层中,前南华系 结晶基岩的磁性分布最广,是全区唯一的区域磁性



2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
11.0
12.0
13.0
14.0
15.0
16.0
17.0
18.0

塔里木磁性基底深度(km)

</td

图 5 塔里木盆地东北部磁性体最小埋深图(a)和磁性基岩深度图(b)

Fig.5 Minimum burial depth of magnetic bodie (a) and magnetic basement depth (b) of northeastern Tarim basin 黄色椭圆为浅层磁性体;黑色虚线、D1到D6及F1、F2代号含义见图1

层,而其他磁性层在分布上都有一定的局限性.所 以说,本区磁性体最小埋藏深度图既反映了前南华 基底的现今构造面貌,又反映了孤立磁性体的大小 和分布范围.

4.2.2 磁性基底深度图的编制 一般而言,在一个地区纵向上往往存在数个具磁性的地质单元,习惯上称为磁性层或磁性界面.前面提到的磁性体最小埋藏深度图(图 5a)是对各类磁性地质体(界面)起伏情况的综合反映.遇有磁性界面重叠时,它反映了上面一层的深度,因而它不能正确地反映地质构造的形态特征.为解决区域构造问题,就应当把不同的磁性界面区分开.为此,需要编制某个地质时代磁性界面深度图,其中磁性基岩与浅部磁性界面的区分最重要,编制磁性基岩深度图的意义就在于此.

在编制基岩深度图时,首先应该查明该区存在 几个连续的或不连续的磁性界面,为此,需要大量 的岩石物性测量资料,除了对磁场进行定量解释 外,还应对全区的深度进行分析,确定它们的地质 时代,其次,还应了解每个磁性界面的分布范围.在 塔里木盆地,磁性基岩主要指前南华系结晶岩石, 因此,该图大体反映了该界面的起伏变化情况.

关于磁性基岩深度图的编制方法基本上与磁性体最小深度图一致,所不同的是前者主要筛选明显不符合实际的深度值(偏深或偏浅),后者则要了解区内区域与局部磁性层的分布范围,对数千个深度值进行认真分析,确定每个深度点的地质时代,筛选掉那些浅层磁性体的深度值,同时根据断裂构造的展布情况,对区域深度进行了适当修正.根据这些原则编制了塔里木盆地东北部磁性基岩深度图(图 5b).

5 结果与讨论

5.1 磁性基底特征

从图 5b可以看出,库鲁克塔格区(D1区)磁性 基底深度一般在9 km以内,南深北浅,梯度很大,沿 北东方向约 30 km的距离内,磁性基底深度由9 km 迅速抬升为1 km左右,与该区存在孔雀河深大断裂 系有关(刘阵, 2013).在地震平面等值线图上,该磁 性基底梯度带对应于一条具有较大倾角和较大垂 直断距的逆断层,最大垂直断距可超过5 km,该逆 断层的南侧发育南华系、震旦系、巨厚的古生界以 及中一新生界地层,其北侧主要发育南华系、震旦 系和新生界地层.库鲁克塔格地区还发育有较多的 浅层磁性体(图 5a),这些磁性体主要存在于前新生 界地层中.

孔雀河斜坡区(D2区)以孔雀河断裂为界与库 鲁克塔格区相邻(刘阵,2013),该区磁性基底深度 一般在9~13 km.孔雀河斜坡区的磁性基底深度梯 度较小,坡度平缓,体现出整体掀斜的特征.在孔雀 河斜坡的北部,发育一系列的浅层磁性体(图5a).

满加尔凹陷区(D3)和英吉苏凹陷区(D4)都属 于塔里木盆地北部凹陷.该区是南华系厚度最大的 地区,同时也是磁性基底深度最大的地区,最深可 达20 km左右,大部分地区超过15 km.并且形成东 西两个基底凹陷中心,与古生界深度变化一致.值 得注意的是,英吉苏凹陷有一个向西南方向收拢至 尖锐锐角的区域,该区域存在一个磁性基底的凸 起,最浅处仅9 km左右,对应于高磁异常.

塔东隆起区(D5)的走向为北东一南西向,其西 南段磁性基底较浅,约为5~9km,其对应的化极磁 异常的梯度较缓;东北段磁性基底较深,约为9~ 15km,其对应的化极磁异常的梯度很陡(图2a),一 般而言,较陡的磁异常梯度带意味着较快的磁性基 底深度变化,因此东北段的磁性基底深度较深是合 理的.

东南凹陷区(D6)主要位于车尔臣断裂以南,该 区磁性基底深度普遍较浅,一般在5km以内,少数 地区可达7km.磁性基底界面的走向总体为北东一 南西向,与地震资料相一致.该区分布有许多平面 上呈近似椭圆形的深度等值线,并且有一系列浅层 磁性体.

为了进一步检验切线法对于塔里木盆地东北 部磁性基底计算结果的准确性,以及探讨其关键地 质属性的需要,本文展示了一条南北向的综合地球 物理剖面(图6),其中布格重力异常数据来自 2015—2016年中国自然资源航空物探遥感中心实 测.从图6可以看出,磁性基底深度与前南华系地层 顶面深度比较接近,表明切线法计算的磁性基底深 度具有很高的可信度.主要原因是切线法是基于厚 板状体的理论假设,而从研究区盆地化极磁异常上 可以看出,低频信号的走向为显著的NEE-SWW向 条带状,与塔里木盆地古生界厚度图、震旦系一南 华系厚度图的等值线走向趋势一致,表明前中生界 地层的厚度分布显著受到前南华系磁性基底的控 制.这也从侧面说明了研究区的磁性基底符合二度



半厚板状体的假设,用切线法来计算研究区的磁性 基底是合适的.将本文计算结果与欧拉反褶积得到 的结果(杨文采等,2012)及地震约束的重磁电联合 反演结果(杨敏等,2022)进行对比,发现本文结果 与重磁电联合反演结果的高磁基底顶面不仅深度 范围一致,而且变化趋势也是一致的;而欧拉反褶 积结果在库鲁克塔格及塔东南隆起等地区,存在大 量15~20 km的磁性基底深度,与本文结果及杨敏 等(2022)的结果有明显差异,原因可能是欧拉反褶 积难以加入地质尤其是地震约束,导致出现一些与 实际地质情况不符的深度计算值.

5.2 关键地质属性探讨

5.2.1 塔东地区主要的前寒武纪构造边界位置由于车尔臣断裂在勘探地震上的显著表现,其垂直断距可达3km(丁长辉等,2008),传统上认为车尔臣断裂为塔里木盆地东部最重要的显生宙构造边界(王步清等,2007),但是从基底的性质差异来讲,塔东隆起的北界(图6中F3)可能是塔东最重要的

构造边界,理由主要有以下4点.(1)塔东隆起北缘 及中部是研究区最为剧烈的化极磁异常梯度带(图 5b),在50 km的南北向距离内,区域磁异常值变化 幅度可达 300 nT,最高可接近 500 nT,这表明塔东 隆起北缘的南北两侧的基底物质组成具有重大差 异. 而塔东隆起与东南凹陷的边界地区, 大致对应 于车尔臣断裂带,该带是一个显著的磁力低区,而 并不是一个显著的磁异常梯度带(图 2a,图 2b,图 6),表明两侧的基底物质组成差异不大.车尔臣断 裂具有巨大的垂向断距,但是却没有引起显著的磁 异常梯度带,其主要原因可能是,塔东隆起的中南 部分与东南凹陷在前寒武纪至少经历了两期明显 的花岗岩化作用(Xu et al., 2013; Zhu et al., 2021).花岗岩一般具有低密度特征,与太古宇变质 基底相比也具有弱磁性特征(表1,表2),因此在重 磁场图上显示为重力低和磁力低.(2)塔东隆起不仅 有研究区最为密集的浅层磁性体,而且塔东隆起北 缘的磁性基底深度变化最为剧烈(图5b),塔东隆起 北缘相对于车尔臣断裂可能经历了更为复杂的前 寒武纪构造活动(Yang et al., 2018).(3)勘探地震 意义上的塔东隆起,也即塔东隆起的前寒武纪变质 基底,其顶面起伏具有显著的短波长特性,明显不 同于北部凹陷地区的长波特征,这表明塔东隆起相 对于北部凹陷具有软弱特征,指示塔东隆起与北部 凹陷不同的构造属性.(4)塔东隆起作为变质基底的 凸起位置,在其周边地表地形非常平坦的情况下, 其布格重力异常并未对应于重力高(图6),这很可 能表明该隆起的变质岩系中可能含有低密度的花 岗质或其变质产物.综上所述,塔里木盆地东部地 区最主要的前寒武纪构造边界可能不是车尔臣断 裂,而是位于塔东隆起北缘附近.

车尔臣断裂主要在显生宙形成、活动(丁长辉 等,2008).虽然车尔臣断裂的活动部分抵消了来自 古阿尔金洋的俯冲对塔里木盆地的影响,但由于塔 东隆起的软弱基底性质,导致塔里木盆地东部的显 生宙断裂主要分布在东南凹陷和塔东隆起,而塔北 凹陷显生宙断裂很少(何碧竹等, 2019),说明基底 强度变化最大的地区在塔东隆起北缘.而且显生宙 断裂走向和新元古界裂陷走向关联较弱,而新元古 界裂陷走向与航磁异常走向关联很强(何碧竹等, 2019).这两种对应关系表明,以车尔臣断裂为代表 的显生宙断裂与前寒武纪基底断裂具有不同的构 造体制.这些证据表明,塔东地区车尔臣断裂仅为 显生宙构造挤压形成的逆冲断层,两侧的基底物质 属性差异不大;而塔东隆起北缘为前南华纪形成的 重要基底边界,两侧基底具有显著的磁性差异和力 学性质差异.

5.2.2 孔雀河斜坡及邻区重磁异常镜像关系成因 综合地球物理剖面(图6)显示,在孔雀河斜坡及其 南北边缘地带,重磁异常呈现显著的镜像关系,但 重力异常基本上与磁性基底和南华系底面的起伏 形态一致.本文通过研究认为,孔雀河斜坡重磁异 常呈镜像关系的主要原因是南华纪一震旦纪裂谷 事件.主要理由有以下3点:(1)孔雀河断裂北侧的 库鲁克塔格相对于南侧的孔雀河斜坡,其磁性基底 抬升幅度可达5 km,如此巨大的垂直抬升在航磁异 常上并没有出现相应的磁力高(图2、图6).一般而 言,决定磁异常幅值的除了基底深度,还有磁性基 底的性质.因此可以认为,孔雀河斜坡基底形态与 磁异常呈镜像关系也应受到磁性基底性质的影响. 图4显示南华系明显比震旦系厚,沉积相研究发现

南华纪为裂谷发育期,震旦纪为凹陷发育期(田雷 等,2020),这意味着南华纪是裂谷事件和岩浆作用 的主要阶段.而南华系沉积中心位于库鲁克塔格和 孔雀河斜坡(图4b),这两个地区可能被南华系裂谷 强烈改造,导致磁性降低,但因该区密度较大的下 伏变质基底呈向北抬升的趋势(石开波等, 2018), 因此重力异常依然主要与基底地形呈正相关关系. (2)在高磁异常带以北,随着南华系厚度的增加,磁 异常幅值快速下降,这表明,南华纪裂谷事件对基 底磁性的降低可能起到了重要作用.(3)塔里木盆地 东部中央高磁异常带的中心位置一般对应于布格 重力异常相对的低值,但高磁异常带之下,无论是 寒武系底界,还是震旦系或南华系的底界,都不是 构造最低点.根据前人的研究,太古代克拉通一般 具有低密度高强度的特点(朱日祥和郑天愉, 2009),这种特点能让其保持长期的构造稳定性,也 从侧面说明未受或较少受到南华纪一震旦纪裂谷 改造的地区仍能呈现磁力高和重力相对低的特征. 塔里木盆地及周缘磁化率实测结果表明,唯有太古 宇地层具有区域意义上的强磁性,可达2300×10-5 SI,因此中央高磁异常带可能是太古宙大陆形成与 地壳演化的产物(Kuang et al., 2022).从区域构造 上来看,塔东隆起和东南凹陷的磁性基底以低磁 性、低密度为特点;北部凹陷中南部受南华纪一震 旦系裂谷作用影响较小的太古宙磁性基底以高磁 性、中等密度为特点;而北部凹陷的北部以及孔雀 河斜坡等沉积了较厚的南华系一震旦系地区,其磁 性基底则为低磁性和相对高的密度.

何碧竹等(2019)认为南华纪一震旦纪的裂谷 体系的走向与磁异常的变化带、突变带及梯度带具 有很好的协调性.但同时发现裂陷区大部分处于相 对低的航磁异常区及负异常区,并认为可能与沉积 岩的弱磁性相关,因此用南华纪一震旦纪基性一超 基性岩来解释塔里木高磁异常有待商榷.塔里木盆 地孔雀河斜坡YL1井下震旦统主要岩性为砂岩和 泥岩互层,南华系特瑞艾肯组主要岩性为白云岩、 灰岩和泥岩等组成,说明该期裂谷事件基性岩并不 十分发育(何碧竹等,2019).综上所述,孔雀河斜坡 以及北部凹陷北部的基底起伏、重力异常与航磁异 常的镜像关系可能是新元古代裂谷作用的产物,该 期裂谷作用对基底磁性起到弱化作用,因而降低了 航磁异常.

6 结论

(1)本文通过成熟稳定的切线法,计算了塔里 木盆地东北部地区的磁性体最小埋藏深度和磁性 基底深度,结果表明,磁性基底深度总体上与勘探 地震结果一致,但在塔东隆起及其北缘,磁性基底 深度变化较为剧烈,对应于研究区最大的磁异常梯 度带;浅层磁性体主要沿着塔东隆起、孔雀河断裂 带和车尔臣断裂带等深大断裂分布.

(2)通过综合地球物理剖面,认为塔东隆起的 北缘应为塔里木盆地东部地区最为重要的基底构 造边界,该构造边界两侧的磁性特征差异显著,其 形成时代应该在前寒武纪,而车尔臣断裂仅为显生 宙形成的弱磁性基底区的内部断裂.

(3) 孔雀河斜坡及邻区的重力异常、基底起伏 与磁异常存在显著的镜像关系,综合分析认为,这 种镜像关系可能是南华纪一震旦纪裂谷作用的产 物,这次裂谷作用降低了塔里木盆地的磁性,而不 是引起高磁异常带的原因.

致谢:审稿专家对稿件提出了中肯而具有建设 性的修改意见,对本文质量的提升起到了重要作 用,在此表示衷心的感谢.

References

- Arkani-Hamed, J., 1988. Differential Reduction-to-the-Pole of Regional Magnetic Anomalies. *Geophysics*, 53(12): 1592-1600. https://doi.org/10.1190/1.1442441
- Barnett, C. T., 1976. Theoretical Modeling of the Magnetic and Gravitational Fields of an Arbitrarily Shaped Three-Dimensional Body. *Geophysics*, 41(6): 1353-1364. https://doi.org/10.1190/1.1440685
- Ding, C. H., Shan, X. L., Li, Q., et al., 2008. Geologic Framework and Structural Evolution of Cheerchen Fracture System in Tarim Basin. *Global Geology*, 27(1): 36-41, 58(in Chinese with English abstract).
- Gay, S. P. Jr, 1963. Standard Curves for Interpretation of Magnetic Anomalies over Long Tabular Bodies. *Geophysics*, 28(2): 161-200. https://doi. org/10.1190/ 1.1439164
- Gu, P.Y., Ji, W.H., Chen, R.M., et al., 2020. Petrogenesis of Neoarchean Ananba Quartz Diorite Gneiss in Southeastern Margin of Tarim: Implications for Crustal Evolution. *Earth Science*, 45(9): 3268-3281(in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. H., Yu, C. C., Zhou, J. X., 2003. The Tangent Technique of ΔT Profile Magnetic Anomaly in the Low

Magnetic Latitude Area. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 27(5): 391-394(in Chinese with English abstract).

- Guo, Z. J., Yin, A., Robinson, A., et al., 2005. Geochronology and Geochemistry of Deep-Drill-Core Samples from the Basement of the Central Tarim Basin. *Journal* of Asian Earth Sciences, 25(1): 45-56. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2004.01.016
- Guo, Z.J., Zhang, Z.C., Liu, S.W., et al., 2003. U-Pb Geochronological Evidence for the Early Precambrian Complex of the Tarim Craton, NW China. Acta Petrologica Sinica, 19(3): 537-542(in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006. Evolution of the Continental Crust. *Nature*, 443(7113): 811-817. https://doi.org/10.1038/nature05191
- He, B.Z., Jiao, C.L., Huang, T.Z., et al., 2019. Structural Architecture of Neoproterozoic Rifting Depression Groups in the Tarim Basin and Their Formation Dynamics. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(4): 635-655(in Chinese).
- Hu, A.Q., Rogers, G., 1992. The Rocks of 3.3 Billion Years were Discovered for the First Time in the Northern Margin of Tarim. *Chinese Science Bulletin*, 37(7): 627-630 (in Chinese).
- Hu, G.Z., Teng, J.W., Ruan, X.M., et al., 2014. Magnetic Anomaly Characteristics and Crystalline Basement Variation of the Qinling Orogenic Belt and Its Adjacent Areas. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(2): 556-571(in Chinese with English abstract).
- Huang, X.Z., Guo, Z.H., Xu, K., 2007. The Development of the Manual Computer Interaction Aeromagnetic Tangent Method System. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 31(6): 572-576(in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., 1997.Structural Characteristics and Oil and Gas in Tarim Basin, China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Jin, Z. J., Zhang, Y. W., Chen, S. P., 2005. Tectonic-Sedimentary Fluctuation Process in Tarim Basin. Science in China (Series D), 35(6): 530-539 (in Chinese).
- Ku, C. C., Sharp, J. A., 1983. Werner Deconvolution for Automated Magnetic Interpretation and Its Refinement Using Marquardt's Inverse Modeling. *Geophysics*, 48 (6): 754-774. https://doi.org/10.1190/1.1441505
- Kuang, X. T., Zhu, X. Y., Ning, F. X., et al., 2022. Aeromagnetic-Imaged Basement Fault Structure of the Eastern Tarim Basin and Its Tectonic Implication. Fron-

tiers in Earth Science, 9: 825498. https://doi.org/ 10.3389/feart.2021.825498

- Laborde, A., Barrier, L., Simoes, M., et al., 2019. Cenozoic Deformation of the Tarim Basin and Surrounding Ranges (Xinjiang, China): A Regional Overview. *Earth-Science Reviews*, 197: 102891. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2019.102891
- Li, X.Q., Ding, H.K., Peng, P., et al., 2021. Provenance of Silurian Kepingtage Formation in Tazhong Area, Tarim Basin: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 46(8): 2819-2831(in Chinese with English abstract).
- Lin, B., Zhang, X., Xu, X. C., et al., 2015. Features and Effects of Basement Faults on Deposition in the Tarim Basin. *Earth-Science Reviews*, 145: 43-55. https:// doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.02.008
- Liu, P. H., Tian, Z. H., Wen, F., et al., 2020. Multiple High-Grade Metamorphic Events of the Jiaobei Terrane, North China Craton: New Evidences from Zircon U-Pb Ages and Trace Elements Compositions of Garnet Amphilbote and Granitic Leucosomes. *Earth Science*, 45 (9): 3196-3216(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., 2013. Tectonic Evolution and Basin-Mountain Coupling Relationship between Kongquehe Slope and Quruqtagh Uplift (Dissertation).China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Long, X. P., Yuan, C., Sun, M., et al., 2011. Reworking of the Tarim Craton by Underplating of Mantle Plume– Derived Magmas: Evidence from Neoproterozoic Granitoids in the Kuluketage Area, NW China. *Precambrian Research*, 187(1/2): 1-14. https://doi.org/10.1016/j. precamres.2011.02.001
- Lu, S. N., Li, H. K., Zhang, C. L., et al., 2008. Geological and Geochronological Evidence for the Precambrian Evolution of the Tarim Craton and Surrounding Continental Fragments. *Precambrian Research*, 160(1/2): 94-107. https://doi.org/10.1016/j. precamres.2007.04.025
- Nabighian, M., 1974. Additional Comments on the Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section. *Geophysics*, 39(1): 85-92. https://doi.org/10.1190/1.1440416
- Portniaguine, O., Zhdanov, M. S., 2002.3-D Magnetic Inversion with Data Compression and Image Focusing. *Geophysics*, 67(5): 1532-1541. https://doi. org/ 10.1190/1.1512749
- Ren, R., Guan, S.W., Wu, L., et al., 2017. The North-South Differentiation Characteristic and Its Enlighten-

ment on Oil-Gas Exploration of the Neoproterozoic Rift Basin, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 38(3): 255– 266(in Chinese with English abstract).

- Shi, K.B., Liu, B., Jiang, W.M., et al., 2018. Nanhua-Sinian Tectono-Sedimentary Framework of Tarim Basin, NW China. Oil & Gas Geology, 39(5): 862-877(in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Deng, X.L., Ma, X.X., 2019. Tectonic Affinity between Central Tianshan Basement and Tarim Block Craton. *Earth Science*, 44(5): 1584-1601(in Chinese with English abstract).
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data. *Geophysics*, 35(2): 293– 302. https://doi.org/10.1190/1.1440092
- Tian, L., Zhang, H.Q., Liu, J., et al., 2020. Distribution of Nanhua-Sinian Rifts and Proto-Type Basin Evolution in Southwestern Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(6): 1122-1133(in Chinese with English abstract).
- Tong, J., Zhang, X. J., Zhang, W., et al., 2018. Marine Strata Morphology of the South Yellow Sea Based on High-Resolution Aeromagnetic and Airborne Gravity Data. *Marine and Petroleum Geology*, 96: 429-440. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.06.018
- Vacquier, V., Steenland, N. C., Henderson, R. G., et al., 1951. Interpretation of Aeromagnetic Maps. Geological Society of America Memoirs 47, 1-150. https://doi. org/10.1130/mem47-p1
- Wang, B.Q., Wang, Q.H., Han, L.J., et al., 2007. Segmentation Characteristics and Dynamic Mechanism of the Che'erchen Fault in the Southeast Tarim Basin. *Oil* & Gas Geology, 28(6): 755-761(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.L., Gao, X.P., Liu, Y.Q., et al., 2010. Crystal Basement Feature of Tiekelike Fault-Uplift at Southern Margin of Tarim Basin. Northwestern Geology, 43(4): 95-112(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.M., Han, C.M., Xiao, W J., et al., 2020. Paleoproterozoic Multiphase Magmatism and Metamorphism Recorded in Metamorphic Basement Rocks of the Northern Altyn Tagh, Southeastern Tarim Craton. *Precambrian Research*, 346: 105827. https://doi.org/10.1016/ j.precamres.2020.105827
- Wu, G.H., Chen, X., Ma, B.S., et al., 2021. The Tectonic Environments of the Late Neoproterozoic–Early Paleozoic and Its Tectono–Sedimentary Response in the Tarim Basin. Acta Petrologica Sinica, 37(8): 2431–2441(in Chinese with English abstract).

- Wu, G.H., Li, H.W., Xu, Y.L., et al., 2012. The Tectonothermal Events, Architecture and Evolution of Tarim Craton Basement Palaeo-Uplifts. Acta Petrologica Sinica, 28(8): 2435–2452(in Chinese with English abstract).
- Wu, L., Guan, S. W., Zhang, S. C., et al., 2018. Neoproterozoic Stratigraphic Framework of the Tarim Craton in NW China: Implications for Rift Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 240-252. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2018.03.003
- Xiong, S.Q., Ding, Y.Y., Li, Z.K., 2014. Characteristics of China Continent Magnetic Basement Depth. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 3981-3993(in Chinese with English abstract).
- Xiong, S.Q, Yang, H., Ding, Y., et al., 2016. Distribution of Igneous Rocks in China Revealed by Aeromagnetic Data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129: 231-242. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.08.016
- Xu, M.J., Wang, L.S., Zhong, K., et al., 2005. Features of Gravitational and Magnetic Fields in the Tarim Basin and Basement Structure Analysis. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 585-592(in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Xiong, S. Q., Tanaka, A., et al., 2021a. Thermal Structure beneath the Tarim Craton and Its Tectonic Implications. *Frontiers in Earth Science*, 9: 700114. https://doi.org/10.3389/feart.2021.700114
- Xu, X., Zuza, A. V., Yin, A., et al., 2021b. Permian Plume-Strengthened Tarim Lithosphere Controls the Cenozoic Deformation Pattern of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Geology*, 49(1): 96-100. https://doi. org/10.1130/g47961.1
- Xu, Z. Q., He, B. Z., Zhang, C. L., et al., 2013. Tectonic Framework and Crustal Evolution of the Precambrian Basement of the Tarim Block in NW China: New Geochronological Evidence from Deep Drilling Samples. *Precambrian Research*, 235: 150-162. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2013.06.001
- Yang, H. J., Wu, G. H., Kusky, T. M., et al., 2018. Paleoproterozoic Assembly of the North and South Tarim Terranes: New Insights from Deep Seismic Profiles and Precambrian Granite Cores. *Precambrian Research*, 305: 151-165. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.11.015
- Yang, M., Yu, P., Zhu, G.Y., et al., 2022. Gravity– Magnetic–Magnetotelluric Joint Inversion Method Coupled with Seismic Constraint Information and Its Application: Case Study of the Analysis of Deep Geological Structure in Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33

(1): 168–179(in Chinese with English abstract).

- Yang, W.C., Wang, J.L., Zhong, H.Z., et al., 2012. Analysis of Regional Magnetic Field and Source Structure in Tarim Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(4): 1278-1287(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Gong, J.H., Yu, S. Y., 2012. c. 1.85 Ga HP Granulite-Facies Metamorphism in the Dunhuang Block of the Tarim Craton, NW China: Evidence from U-Pb Zircon Dating of Mafic Granulites. Journal of the Geological Society, 169(5): 511-514. https://doi.org/ 10.1144/0016-76492011-158
- Zhao, P., He, J. Y., Deng, C. L., et al., 2021. Early Neoproterozoic (870-820 Ma) Amalgamation of the Tarim Craton (Northwestern China) and the Final Assembly of Rodinia. *Geology*, 49(11): 1277-1282. https://doi.org/ 10.1130/g48837.1
- Zhu, G. Y., Chen, Z. Y., Chen, W. Y., et al., 2021. Revisiting to the Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Tarim Block, NW China. *Precambrian Research*, 352: 106013. https://doi.org/10.1016/j. precamres.2020.106013
- Zhu, R.X., Zheng, T.Y., 2009. Failure Mechanism of North China Craton and Paleoproterozoic Plate Tectonic System. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1950-1961(in Chinese).
- Zhu, W.B., Ge, R.F., Wu, H.L., 2018. Paleoproterozoic ca. 2.0 Ga Magmatic-Metamorphic Event in the Northern Altyn Tagh Area. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 1175-1190 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁长辉,单玄龙,李强,等,2008.塔里木盆地车尔臣断裂系 地质结构与构造演化.世界地质,27(1):36-41,58.
- 辜平阳, 计文化, 陈锐明, 等, 2020. 塔里木地块东南缘新太 古代安南坝石英闪长片麻岩的成因及其对地壳演化的 启示.地球科学, 45(9): 3268-3281.
- 郭召杰,张志诚,刘树文,等,2003. 塔里木克拉通早前寒武 纪基底层序与组合:颗粒锆石 U-Pb 年龄新证据. 岩石 学报,19(3): 537-542.
- 郭志宏, 于长春, 周坚鑫, 2003. 低磁纬度区ΔT 剖面磁异常场源深度计算的切线法.物探与化探, 27(5): 391-394.
- 何碧竹, 焦存礼, 黄太柱, 等, 2019. 塔里木盆地新元古代裂 陷群结构构造及其形成动力学.中国科学:地球科学, 49(4): 635-655.
- 胡霭琴,格雷姆·罗杰斯,1992.新疆塔里木北缘首次发现 33亿年的岩石.科学通报,37(7):627-630.
- 胡国泽,滕吉文,阮小敏,等,2014.秦岭造山带和邻域磁异 常特征及结晶基底变异分析.地球物理学报,57(2):

556 - 571.

- 黄旭钊, 郭志宏, 徐昆, 2007. 交互式航磁异常切线法系统 研制. 物探与化探, 31(6): 572-576.
- 贾承造,1997.中国塔里木盆地构造特征与油气.北京:石油 工业出版社.
- 金之钧,张一伟,陈书平,2005.塔里木盆地构造一沉积波 动过程.中国科学(D辑:地球科学),35(6):530-539.
- 李祥权,丁洪坤,彭鹏,等,2021. 塔里木盆地塔中志留系柯 坪塔格组物源示踪:碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 地球 科学,46(8):2819-2831.
- 刘平华,田忠华,文飞,等,2020. 华北克拉通胶北地体多期 高级变质事件:来自石榴斜长角闪岩与花岗质浅色体 锆石 U-Pb 定年与稀土元素的新证据.地球科学,45 (9):3196-3216.
- 刘阵,2013. 孔雀河斜坡与库鲁克塔格断隆的耦合关系及构 造演化(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 任荣,管树巍,吴林,等,2017.塔里木新元古代裂谷盆地南 北分异及油气勘探启示.石油学报,38(3):255-266.
- 石开波,刘波,姜伟民,等,2018. 塔里木盆地南华纪一震旦 纪构造一沉积格局.石油与天然气地质,39(5): 862-877.
- 舒良树, 邓兴梁, 马绪宣, 2019. 中天山基底与塔里木克拉 通的构造亲缘性. 地球科学, 44(5): 1584-1601.
- 田雷,张虎权,刘军,等,2020.塔里木盆地西南部南华纪— 震旦纪裂谷分布及原型盆地演化.石油勘探与开发, 47(6):1122-1133.

- 王步清,王清华,韩利军,等,2007.塔里木盆地东南部车尔 臣断裂的分段特征及动力学机制.石油与天然气地质, 28(6):755-761.
- 王向利,高小平,刘幼骐,等,2010. 塔里木盆地南缘铁克里 克断隆结晶基底特征.西北地质,43(4):95-112.
- 邬光辉, 陈鑫, 马兵山, 等, 2021. 塔里木盆地晚新元古代一 早古生代板块构造环境及其构造一沉积响应. 岩石学 报, 37(8): 2431-2441.
- 邬光辉,李浩武,徐彦龙,等,2012. 塔里木克拉通基底古隆 起构造一热事件及其结构与演化. 岩石学报,28(8): 2435-2452.
- 熊盛青,丁燕云,李占奎,2014.中国陆域磁性基底深度及 其特征.地球物理学报,57(12):3981-3993.
- 徐鸣洁, 王良书, 钟锴, 等, 2005. 塔里木盆地重磁场特征与 基底结构分析. 高校地质学报, 11(4): 585-592.
- 杨敏,于鹏,朱光有,等,2022.耦合地震约束信息的重磁电 联合反演方法及其应用:以塔里木盆地深层地质结构 解析为例.天然气地球科学,33(1):168-179.
- 杨文采, 王家林, 钟慧智, 等, 2012. 塔里木盆地航磁场分析 与磁源体结构. 地球物理学报, 55(4): 1278-1287.
- 朱日祥,郑天愉,2009.华北克拉通破坏机制与古元古代板 块构造体系.科学通报,54(14):1950-1961.
- 朱文斌, 葛荣峰, 吴海林, 2018. 北阿尔金地区古元古代 ca.2.0 Ga 岩浆-变质事件. 岩石学报, 34(4): 1175-1190.