

# 塔里木盆地高分辨率卫星磁异常特征

王小多, 程顺有, 许小强

(西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系, 西安 710069)

**摘要** 本文使用美国国家地球物理数据中心(NGDC)提供的岩石圈磁场球谐模型的球谐系数, 计算了塔里木盆地 16~720 阶、高度为 0 km 的垂向分量  $\Delta Z$ , 反映了塔里木地区高分辨率的卫星磁异常特征. 盆地北部和南部的磁性特征明显不同, 分界线大体在北纬 40° 附近, 北部表现为东西向的负异常, 南部表现为正异常特征, 整体呈北东走向, 中部被北西向异常所叠加. 结合区域地质背景, 对盆地内部的磁异常特征综合分析表明, 盆地基底可能并非一个完整块体, 而是由多个古老地块拼合而成.

**关键词** 球谐分析, 岩石圈磁场, 长波长特征, 空间分辨率, 塔里木盆地

**中图分类号** P353.P3      **文献标识码** A      **文章编号** 1004-2903(2008)02-0025-06

## The feature of high resolution satellite magnetic anomalies over Tarim basin

WANG Xiao-duo, CHENG Shun-you, XU Xiao-qiang

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract** Spherical harmonic coefficients of lithospheric magnetic field model provided by National Geophysical Data Center (NGDC) are used in this paper. Taking Tarim basin for example, vertical component  $\Delta Z$  in the altitude of 0 km using spherical harmonic degree 16~720 were computed, which indicates the feature of higher resolution satellite magnetic anomalies. The magnetic features of the north and the south of Tarim basin are different obviously, whose boundary lies in 40°N nearly. The northern part shows negative anomaly with EW trending and the southern portion, as a whole, positive anomaly with NE trending, which is superposed by NW trending. Considering the regional geologic conditions, comprehensive analysis of the satellite magnetic anomalies characters in this area suggest that the basin basement probably is composed of a few old blocks.

**Keywords** spherical harmonic analysis, lithospheric magnetic field, long wavelength feature, spacial resolution, Tarim basin

### 0 引言

地磁场在时间和空间上是不断变化的, 所以对地磁场进行连续的、精确的测量就显得尤为重要. 卫星磁测提供了高质量的、覆盖全球的数据, 为研究地球内部圈层耦合、物质与能量交换的空间表现、地震预测和地球动力学等提供了重要资料<sup>[1,2]</sup>. 第一颗磁测卫星是俄罗斯发射的 Sputnik(1958); 美国的第一颗磁测卫星是 POGO(1967~1971), 接着又发射了 MAGSAT(1979), 使用该数据得到了不同区

域的磁异常图; 1999 年丹麦发射了 Ørsted 卫星, 不久德国发射了 CHAMP 卫星(2000), 这两颗卫星的精度达到了几纳特; 还有美国和阿根廷合作发射的 SAC-C 卫星(2000); 这些卫星从空间上对地球磁场进行了持续地观测. 为了更好的分离出磁场的时间和空间上的变化, 欧洲航空局正在计划准备在 2009 年发射由三颗卫星组成的 Swarm 卫星群<sup>[3]</sup>.

卫星的飞行高度大约为 300 km~500 km, 平均高度在 400 km 左右, 观测的磁场是地核场、岩石圈磁场、感应场、电离层场和磁层场的叠加场<sup>[4]</sup>, 为了了解大地构造特征和岩石圈大规模构造的重要信

收稿日期 2007-05-10; 修回日期 2007-08-20.

作者简介 王小多, 女, 1980 年生, 内蒙古呼伦贝尔人, 西北大学地质学系硕士研究生, 主要从事地球探测与信息技术研究. (E-mail: xi-  
aoduow@163.com)

息,从中分离出岩石圈场是必要的.如果在研究中,不充分考虑和处理这些因素,就会导致对岩石圈磁场强度估计不准<sup>[5,6]</sup>.这样,在使用卫星数据研究地球的岩石圈场时,必须把其它几部分的磁场排除掉,就需要对卫星磁测资料进行数据选择、处理等,建立合理的地磁场模型.卫星磁异常理论模型的数学方法常用球谐分析方法、冠谐分析方法、矩谐分析方法和等效源方法<sup>[7-9]</sup>.本文利用球谐分析方法以塔里木盆地为例,对其磁性特征进行分析.

## 1 卫星磁异常的球谐模型

地磁位  $V$  可表示为

$$V = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta),$$

地磁场分量可表示为

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta},$$

$$Y = \frac{-1}{r \sin\theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n \frac{m}{\sin\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \times (g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) P_n^m(\cos\theta),$$

$$Z = \frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n - (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \times (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta).$$

式中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别表示地磁北向分量、东向分量和垂向分量,  $a$  是参考球半径 ( $a = 6371.2$  km),  $r$  是从地心算起的径向距离,  $\theta$  是地理余纬,  $\lambda$  是经度,  $P_n^m(\cos\theta)$  是施密特准归一化  $n$  阶  $m$  次缔合勒让德函数,  $g_n^m$  和  $h_n^m$  是待定的球谐系数,  $N$  为球谐分析的截断阶数.

地核场和岩石圈场用施密特准归一化勒让德函数的双重求和形式表示,其中的球谐系数,亦称高斯系数,一般认为对于  $1 \leq n \leq 12$ , 磁场主要来自地核 ( $n$  是球谐函数的阶数); 对于  $n \geq 16$ , 磁场主要来自岩石圈; 当  $13 \leq n \leq 15$  时, 地核和岩石圈均有贡献<sup>[10]</sup>. 减去地核场后, 就可以得到岩石圈场.

Olsen 等人<sup>[11]</sup> 使用 CHAMP 卫星数据, 提出 CHAOS 模型, 球谐阶达到 50 阶. Maus 等人使用 CHAMP 卫星近 5 年的数据, 得到了第 4 代岩石圈磁场模型 MF4<sup>[12]</sup>, 球谐阶达到 90 阶, 精度明显比前三代模型 MF1、MF2 和 MF3 有所提高. 他们又提出 POMME 模型系列, 分别为 POMME-2.4、POM-

ME-3.0 和 POMME-3.1, POMME-3.1 模型的功率谱曲线在 25 阶到 90 阶与 MF4 模型相吻合<sup>[13]</sup>. 本文使用美国 National Geophysical Data Center (NGDC) (<http://www.ngdc.noaa.gov/EMM>) 提供的 16~720 阶球谐系数, 直接计算得到岩石圈磁场, 空间分辨率明显提高.

在 400 km 的卫星高度, 测得的是所谓的长波长的异常, 主要反映下地壳和上地幔范围的磁性变化<sup>[14]</sup>. 球谐阶次不同表示磁异常的波长范围不同, 一般认为, 波长范围会随着球谐阶数的增大而减小, 空间分辨率随着球谐阶的增大而提高. Cain 等人 and Arkani-Hamed 等人分别用 13~29 阶和 18~41 阶的谐和项表示 MAGSAT 卫星磁异常的分布, 得到的波长范围分别为 1380~3078 km 和 920~2200 km<sup>[15]</sup>, NGDC-720 模型的波长范围为 56~2500 km. 当卫星飞行高度为 400 km, 球谐阶为 16~90 阶时, 计算得到垂向分量  $\Delta Z$  的值(图 1), 该图与付媛媛等人<sup>[16]</sup> 使用 CHAMP 卫星数据, 冠谐分析方法, 当  $K_{\max} = 30$ ,  $h = 400$  km 时的  $\Delta Z$  等值线图基本一致. 由图 1 可以看出, 青藏高原向北有明显的大规模北东向负异常, 在长江以南四川盆地以东地区也表现为负异常, 尤其是塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地具有被四周梯级带所围绕的显著正异常特征.

## 2 区域地质背景

塔里木盆地位于天山、昆仑山、阿尔金山之间, 南天山构成板块北部被动边缘, 西昆仑与阿尔金分别构成板块南部和东南部活动边缘, 是一个由古生代克拉通盆地和中、新生代前陆盆地组成的大型叠合盆地, 是我国最大的沉积盆地. 不同时期盆地内的隆起单元既有继承, 又有反转, 因此盆地构造单元的划分十分复杂. 按构造性质可划分为隆起构造、拗陷构造、边缘断隆 3 类共 12 个构造单元(图 2), 包括 7 个隆起、5 个拗陷, 盆地内部为 3 个隆起, 5 个拗陷.

盆地内部的 3 个隆起为塔北隆起、中央隆起和塔南隆起. 塔北隆起位于塔里木河以北, 呈东西向延伸; 中央隆起位于盆地的中央, 亦呈东西向展布; 塔南隆起位于盆地的东南部, 构造呈北东东向. 5 个拗陷为库车拗陷、北部拗陷、西南拗陷、东南拗陷和塘古孜巴斯拗陷. 库车拗陷是中、新生代连续沉降构造, 隆起发育于第四纪; 北部拗陷是一个长期演化发展的巨型负向构造, 东西两部分明显不同; 西南拗陷是典型的中新世—上新世发育的前陆拗陷, 昆仑山

对其发展起到不可忽视的作用;塘古孜巴斯坳陷发育复杂的古逆冲带构造,有大量逆冲断层及伴生褶皱断层;东南坳陷处在昆仑山北缘与塔里木南缘之

间,受北东东向的阿尔金断裂的控制.库鲁克塔格断隆、柯坪断隆、铁克力克断隆和阿尔金山断隆属于盆地的边缘断隆.

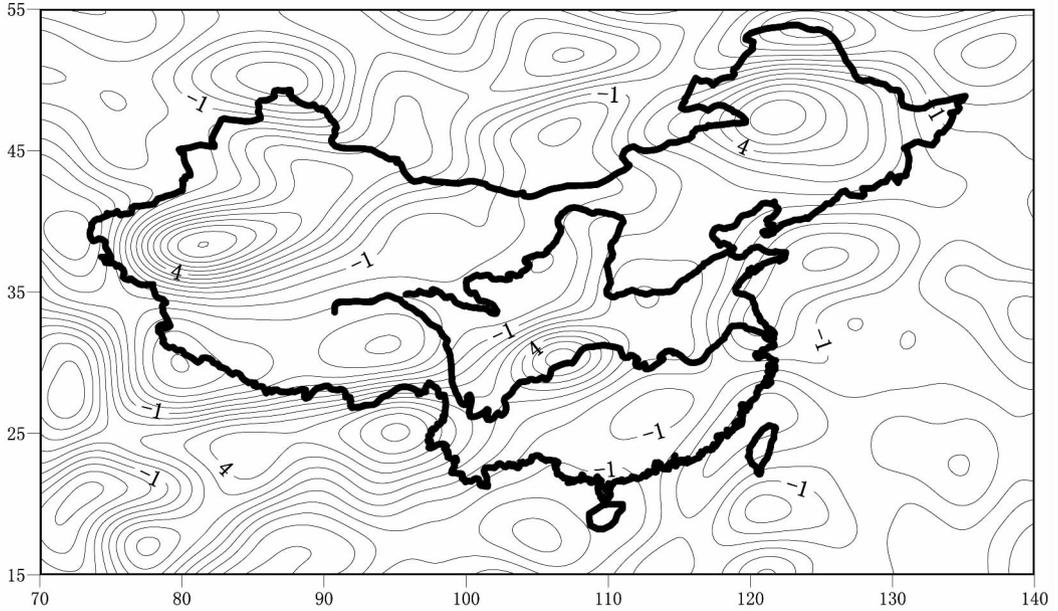


图 1 卫星飞行高度  $h=400\text{ km}$ ,球谐阶为 16~90 阶的垂向分量  $\Delta Z$  磁异常图(等值线间距为 1nT)  
 Fig. 1 Magnetic anomaly map of the vertical component  $\Delta Z$  ( $h=400\text{ km}$ , degree=16~90).  
 (Contour interval is 1nT)

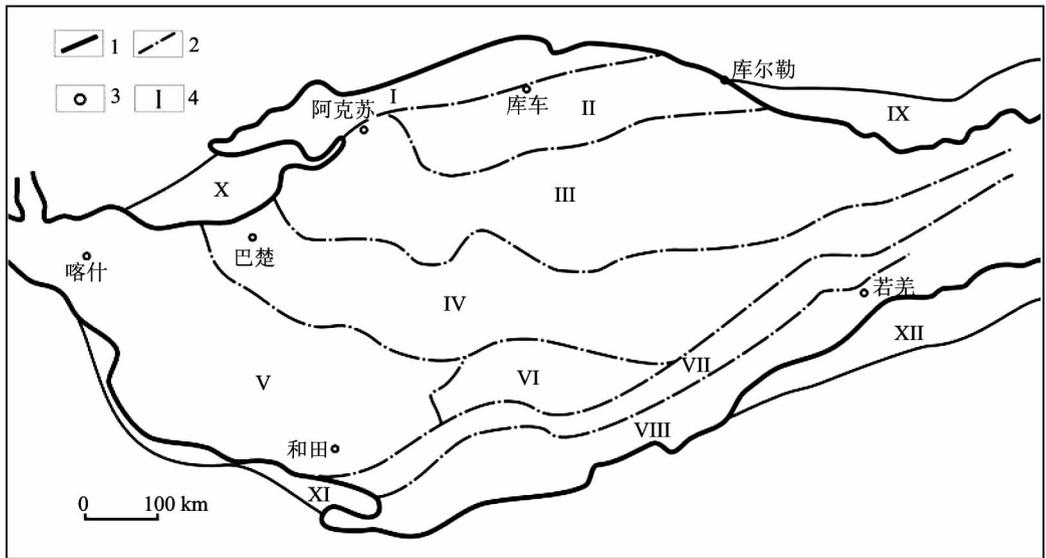


图 2 塔里木盆地构造区划图(据文献[17]简化)

1-盆地边界;2-单元界线;3-地名;4-构造单元编号; I -库车坳陷; II-塔北隆起;  
 III-北部拗陷; IV-中央隆起; V-西南拗陷; VI-塘古孜巴斯坳陷; VII-塔南隆起; VIII-东南拗陷;  
 IX-库鲁克塔格断隆; X-柯坪断隆; XI-铁克力克断隆; XII-阿尔金山断隆

Fig. 2 Map of structure units for Tarim basin. (Modified from article [17])



磁<sup>[19,30]</sup>类似的北东向强弱相间的磁异常特征,可能与该拗陷基底的北东向隆凹格局<sup>[31]</sup>有关.塔中及以北地区发育近北西向正负磁异常带,石油地震发现该区主体构造为北西走向,同时在布格重力图上也有明显反映<sup>[17,28,30]</sup>,说明老基底构造对盖层可能有一定的控制作用.塔南隆起和东南拗陷地区磁异常特征分布整体呈北东走向,而且呈串珠状剧烈变化,说明深部地质构造较复杂.盆地南北卫星磁异常特征的显著差异一方面说明了两者的基底性质,另一方面说明了在两者拼合之后,各自经历了不同的构造事件<sup>[17,32]</sup>,形成塔北和塔南两个稳定地块<sup>[33,34]</sup>.反映整体岩石圈磁性特征的卫星磁异常,可以提供大尺度的深部构造信息.与青藏高原卫星磁场相比,在新生代印度板块向欧亚大陆强烈挤压的影响下<sup>[35]</sup>,塔里木盆地岩石圈变形较弱,以整体刚性旋转<sup>[36]</sup>为主,而不是弥散性变形<sup>[37]</sup>.

## 5 结论与讨论

(1)利用美国 National Geophysical Data Center(NGDC)提供的 16~720 阶球谐系数,计算了塔里木盆地地球谐阶为 16~720 阶、高度为 0 km 的垂向分量  $\Delta Z$ ,卫星磁异常的空间分辨率得到了显著提高.由于区域条件等因素的限制,不利于地面磁测和航空磁测的地区,可选择使用高分辨率的卫星磁测数据.

(2)塔里木盆地北部和南部的磁性特征明显不同,分界线大体在北纬 40°附近.岩石圈相对冷而厚的塔南地区表现为强的正磁异常特征,但每个地区又表现出各自的磁性特点,说明盆地基底可能由多个古老块体拼合而成,而非一个完整块体.

(3)塔里木盆地整体强磁性特征反映其岩石圈缺乏弥散性变形,而是以整体刚性位移(或旋转)为主,这对于探索陆内岩石圈变形机制具有重要意义.

## 参 考 文 献 (References):

[1] 赵国泽,陈小斌,蔡军涛.电磁卫星和地震预测[J].地球物理学进展,2007,22(3):667~673.  
 [2] 詹艳,王继军,汤吉,等.利用卫星探测研究地下结构[J].地球物理学进展,2007,22(3):702~707.  
 [3] Mioara M, Michael P. Observing, modeling, and interpreting magnetic field of the solid Earth[J]. 2005, revision3\_manuscript. tex.  
 [4] Mioara M. Magnetic satellite missions: where have we been and where are we going? [J]. C. R. Geoscience, 2006, 38: 1002~1011.  
 [5] Maus S, Rother M, Holme R, et al. First scalar magnetic a-

nomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field[J]. Geophysical research letters, 2002, 29(14): 1029~2001.  
 [6] 王宜文. 二十世纪的地球偶极子磁场[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1):52~55.  
 [7] 安振昌. 卫星磁异常的理论模型[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(2):55~62.  
 [8] 高金田,安振昌,顾左文,等. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1):56~62.  
 [9] 王月华. MAGSAT 卫星矢量磁异常的矩谐分析[J]. 地球物理学报, 1992, 35(5):655~660.  
 [10] 张昌达. 岩石圈磁场研究—卫星地磁学的一个新分支[J]. 地质科技情报, 2001, 20(3):83~90.  
 [11] Olsen N, et al. CHAOS—a model of Earth's magnetic field derived from CHAMP, Orsted, and SAC-C magnetic satellite data[J]. Geophys. J. Int., 2006,10:1365~2468.  
 [12] Maus S, Rother M, Hemant K, et al. Earth's lithospheric magnetic field determined to spherical harmonic degree 90 from CHAMP satellite measurements[J]. Geophys. J. Int., 2006.  
 [13] Maus S, Rother M, Stolle C, et al. Third generation of the Potsdam Magnetic Model of the Earth (POMME) [J]. Journal of geophysical research, 2006.  
 [14] Kumar H, Stafan M. Why no anomaly is visible over most of the continent-ocean boundary in the global crustal magnetic field[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2005, 149:321~333.  
 [15] 安振昌. 卫星磁异常研究[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 23~29.  
 [16] Fu Y Y, Liu Q S, Yang T. Modeling and interpreting CHAMP magnetic anomaly field over China continent using spherical cap harmonic analysis[J]. Journal of China University of Geosciences,2004, 15(3):335~340.  
 [17] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1997.  
 [18] Wiger A W. On the differential properties of internal magnetic field models at the Earth's surface and at satellite altitudes [J]. Journal of Geodynamics, 2007, 43(2007):39~247.  
 [19] 朱英. 中国及邻区大地构造和深部构造纲要—全国 1:100 万航磁异常图的初步解释[M]. 北京:地质出版社,2004.  
 [20] 袁学成. 中国地球物理图集[M]. 北京:地质出版社,1996.  
 [21] 车自成,刘良,罗金海. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京:科学出版社,2002.  
 [22] 李庆春,许炳如. 塔里木盆地居里等温面特征及其地质意义[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(5):590~594.  
 [23] 胥颐,刘福田,刘建华,等. 中国西北大陆碰撞带的深部特征及其动力学意义[J]. 地球物理学报,2001,44(1):40~47.  
 [24] 肖序常,刘训,高锐,等. 新疆南部地壳结构和构造演化[M]. 北京:商务印书馆,2004.  
 [25] 王勤,徐鸣洁,贺绍英,等. 库车—塔中—塔南剖面磁异常反演与塔里木盆地基底演化[J]. 高校地质学报,2000,6(1): 34~39.

- [26] 王良书, 李成, 施央申. 塔里木盆地大地热流密度分布特征[J]. 地球物理学报, 1995, 38(6):855~856.
- [27] 王良书, 李成, 杨春. 塔里木盆地岩石层热结构特征[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6):794~803.
- [28] 腾吉文. 塔里木地球物理场与油气[M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [27] 胥颐, 刘建华, 刘福田, 等. 天山—帕米尔结合带的地壳速度结构及地震活动研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):469~476.
- [29] 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 等. 青藏高原中西部航磁调查[M]. 北京:地质出版社, 2001.
- [31] 曲国胜, 李亦纲, 李岩峰, 等. 塔里木盆地西南前陆构造分段及其成因[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(3):193~202.
- [32] 贾承造. 塔里木盆地中新生代构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
- [33] 胥颐, 刘福田, 刘建华, 等. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像[J]. 中国科学(D辑), 2004, 30(2):113~122.
- [34] 姜春发. 塔里木地台开合构造简述[J]. 新疆地质, 1997, 15(3):193~202.
- [35] 贺日政, 高锐, 郑洪伟, 等. 青藏高原中西部航磁异常的匹配滤波分析与构造意义[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4):1131~1140.
- [36] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):415~427.
- [37] Philip E, Peter M. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia[J]. J. Geophys. Res, 2005, 110(B12401).