

基于2008年CHAMP卫星地磁总强度数据分析中国及邻区地磁异常特征*

王 粲^{1,2}, 袁浩浩¹, 王振东¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. USGS, Menlo park, CA 94025, USA)

摘要: CHAMP 卫星 10 年的观测任务提供了大量高精度的地磁观测数据。利用 2008 年 CHAMP 卫星地磁总强度 F 观测数据, 通过地磁指数及地方时阈值为参数选取地磁活动较为平静期间的卫星观测资料, 并利用地磁参考模型去除主磁场和外源场成分, 获得了中国及邻区地磁异常分布。结果表明: 卫星磁异常的分布特征与地质构造有较好的对应关系, 塔里木盆地、四川盆地、松辽盆地、印度地台及华北平原部分地区表现为正磁异常, 青藏高原和阿尔泰造山带地区表现为负磁异常。

关键词: 岩石圈磁场; CHAMP 卫星; 地磁总强度; 卫星磁异常; 地质构造

中图分类号: P318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)03-0399-05

0 引言

地磁场由主磁场、岩石圈磁场、变化磁场和感应磁场 4 大部分组成, 岩石圈磁场作为其中一个重要组成部分, 一直是地磁学领域的一个重要研究课题。由于岩石圈磁场的分布和时间变化受岩石圈物质磁化率参数、地质构造及其运动历史、岩石圈温度和应力状态等影响, 因此岩石圈磁场的研究被广泛应用于大地构造与大陆动力学研究、自然灾害的地质构造研究与预测预报、金属矿产与油气藏资源勘探等领域, 具有重要的理论意义和应用价值 (Blakely, 1996; Langel, Hinze, 1998; 徐文耀等, 2008)。

传统的磁测方式包括地面固定台站观测、地面流动观测、航空地磁观测、航海地磁观测和卫星地磁观测等, 其中卫星地磁观测是最先进、最高效、精度最高的一种观测方式 (Olsen *et al*, 2010)。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测量就显得尤为重要。与地面和航空观测相比, 卫星观测不受自然、气候等条件的限制, 可以在短时间内实现全球测量覆盖, 不留空白区, 提供高精度、高空间分辨率

和高时间重复率的地磁场测量数据。由于卫星飞行高度较高, 测量得到的主要是中、长波成分, 主要反映下地壳和上地幔大范围的磁性变化, 减小了区域各向异性的影响 (康国发等, 2010; 杜劲松, 2015; 张昌达, 2003), 因而可以更好地用于研究区域与全球尺度的大地构造、地壳深部与上地幔顶部的磁性变化, 也正是基于上述优点, 基于卫星观测数据建立全球及区域磁场模型成为当今地磁学领域的热点。

本文利用 2008 年 CHAMP 卫星地磁总强度数据提取了中国及邻区地磁异常信息, 并进一步分析卫星磁异常分布特征与地质构造的对应关系。

1 数据的选取和处理

1.1 CHAMP 卫星数据

自 1958 年前苏联发射第一颗装有磁力仪的卫星 SPUTNIK-3 以来, 随着 POGO、MAGSAT、Ørsted、CHAMP 和 SAC-C 等磁测卫星相继发射, 卫星磁测技术快速发展 (表 1) (冯彦, 2011)。磁测卫星的测量精度不断提高, 测量方式由单一标量测量逐渐发展为标量与矢量同时测量, 卫星轨道也更加优化。

* 收稿日期: 2017-01-21.

基金项目: 2015 年度地震行业科研专项——2015.0 年代中国地磁参考场编制 (201508013) 和中国综合地球物理场观测——大华北地区 (201508009) 联合资助。

表 1 主要磁测卫星基本信息
Tab. 1 The basic information of main magnetic satellites

卫星名称	所属国家	在轨时间	轨道倾角/ (°)	卫星飞行 高度/km	磁测仪器	观测精度/ nT
SPUT NIK - 3	前苏联	1958—1960	65	217 ~ 1 864	磁通门式磁力仪	~ 100
COSMOS49	前苏联	1964—1964	50	261 ~ 288	质子磁力仪	~ 22
POGO2	美国	1965—1967	87	413 ~ 1 510	铷蒸气光泵磁力	> 6
POGO4	美国	1967—1969	86	412 ~ 908	铷蒸气光泵磁力	> 6
POGO6	美国	1969—1971	82	397 ~ 1 098	铷蒸气光泵磁力	> 6
MAGSAT	美国	1979—1980	97	200 ~ 550	磁通门式磁力仪铷蒸气光泵磁力	~ 6
Ørsted	丹麦	1999—2002	96	638 ~ 850	磁通门式磁力仪质子磁力仪	4
CHAMP	德国	2000—2010	87	310 ~ 450	磁通门式磁力仪质子磁力仪	3
SAC - C	阿根廷、巴西、丹麦、 法国、意大利、美国	2001—2004	97	698 ~ 705	氦光泵磁力仪	4

CHAMP 卫星是 2000 年 7 月由德国发射的一颗低轨、近圆形、近极地轨道的专业磁测卫星，卫星总运行时间 10 a，其以高精度的观测仪器、较长的观测周期和更优化的轨道参数提供了大量不间断的、均匀分布的、高精度的地磁场标量 (F) 和矢量 (X 、 Y 、 Z) 观测数据。该卫星有较高的轨道倾角，约 87.3° ，可覆盖全部当地时间，保证卫星的观测范围基本覆盖整个地球。该卫星自发射后经过 5 a 的飞行，飞行高度由最初的 460 km 逐渐降低到 330 km (图 1a)，提供了更高分辨率的地磁观测数据。CHAMP 卫星对各地磁要素的时间采样率为 1 s、轨道上的平均采样距离约 8 km。卫星上搭载了高精度的 Fluxgate 磁通门磁力仪和 Overhauser 质子磁力仪：Fluxgate 磁通门磁力仪开展磁场的三分量测量，可提供近 150 m 轨道上的空间分辨率；Overhauser 质子磁力仪则用于测量磁场的标量值，它以 1 Hz 的速率对周围磁场强度采样，其绝对精度小于 0.5 nT (Mandea, Purucker, 2005)。

利用卫星观测数据研究岩石圈磁异常，减少外源场的影响是一项基本原则。为达到这一原则，通过研究分析选取了 CHAMP 卫星 2008 年地磁总强度 F 数据，该时间段内卫星轨道高度约为 320 ~ 345 km，飞行高度相对较低 (图 1a)，同时太阳辐射的影响较低，F10.7 指数较小，因此数据较少受到外源场的影响 (图 1b)。数据的覆盖范围为 ($0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ ， $50^\circ \sim 150^\circ\text{E}$)。

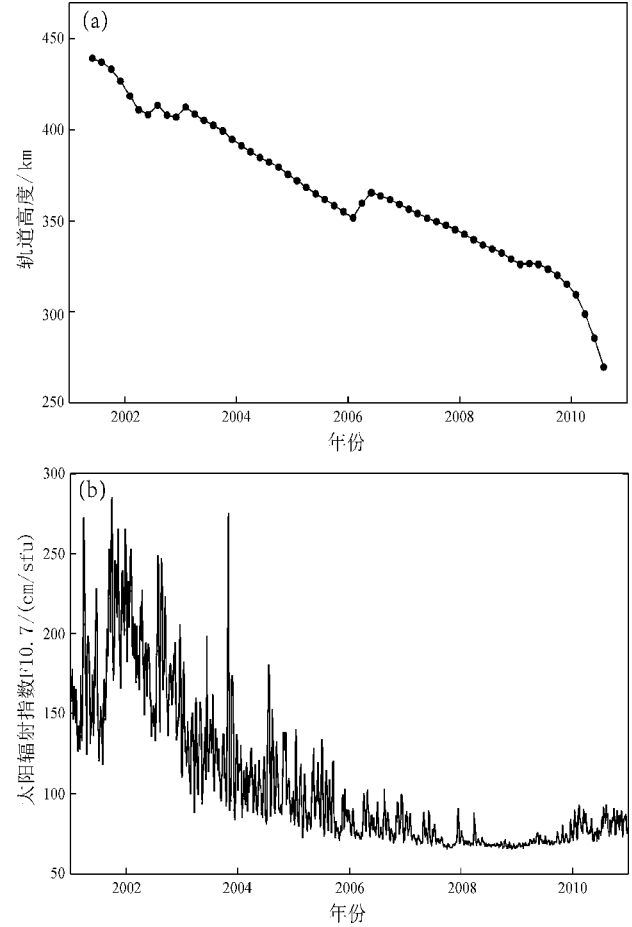


图 1 2001—2010 年卫星飞行高度 (a)
及 F10.7 指数变化 (b)
Fig. 1 Satellite altitude (a) and the F10.7 index
changes (b) during 2001 and 2010

1.2 卫星数据的筛选

卫星地磁观测数据中不仅包含地球主磁场和局部地磁异常场的信息，还包括了丰富的电离层磁场和磁层磁场快速时间变化的信息。为了更好地提取岩石圈磁场信息，减少外源场的影响，应尽可能消除电离层磁场和磁层磁场成分。

电离层磁场最主要的典型变化为 S_q 变化，该变化的空间分布集中在中低纬地区，在地方时正午时段变化剧烈，在地方时午夜时段能量达到最低。因此，采取适当的地方时观测窗口对卫星观测数据进行筛选，选择地球夜晚一侧的资料，即地方时 22:00—03:00 (LT) 之间的数据，可以有效地降低或消除 S_q 变化。

磁层磁场的主要变化为磁暴事件、地磁扰动和种种高纬异常现象，衡量这些变化的参数主要有 K_p 指数和 Dst 指数。 K_p 指数用于衡量全球地磁活动性， $K_p < 4$ 表示地磁场扰动很小或几乎没有扰动，中纬度地区一般选取 $K_p < 2^+$ 的资料。经常在考虑 K_p 指数的同时也参考 Dst 指数的变化， Dst 指数用于衡量赤道环电流的强度，通常选择 $-30 \leq Dst \leq 30$ 的资料。采用适当的 Dst 指数和 K_p 指数阈值对卫星数据进行筛选，可以有效地降低或消除磁层磁场成分，因此我们选用了 $K_p < 2$ 且 $Dst < |30|$ 的卫星观测资料。

1.3 非岩石圈磁场的改正

为了从卫星观测数据中提取岩石圈磁场信息，就必须消除数据中其余的内源场和外源场成份，因此需要进一步对筛选过的卫星观测数据进行非岩石圈场源的地磁场改正。

地磁场的内源部分由主磁场、岩石圈磁场和感应场共同组成，其中感应场占的比例很小，与主磁场和岩石圈磁场相比近似为零，因而从地球内源磁场中去除主磁场后，得到的残余磁场部分称为岩石圈磁场（也称为地壳磁场或地磁异常）。实测数据中主磁场和岩石圈磁场成分叠加在一起，而且岩石圈磁场分布复杂、区域性强，传统的方法是通过从地磁实测数据中减去主磁场部分得到剩余磁场，建立区域磁异常模型从而研究其分布规律（安振昌等，1992）。因此我们选用第 12 代国际地磁参考场（IGRF12）作为主磁场模型，首先计算每个 CHAMP 卫星实测点处的主磁场成分，再从经过筛选的卫星观测资料中扣除 13 阶以下的

主磁场部分，从而得到卫星高度的地磁异常场值。

进一步考虑到数据中仍包含有外源磁场的影响，包括电离层磁场、磁层磁场及其感应场，我们通过 CHAOS-6 磁场模型计算并将其消除，从而获得较为真实可靠的岩石圈磁场异常数据（Finlay *et al.*, 2015）。CHAOS-6 模型的建立使用了 2000—2010 年 CHAMP 卫星标量及矢量磁测数据，因此在数据处理过程中可以尽量减小地磁场模型所带来的误差。

1.4 资料网格化

经过以上数据处理之后得到的数据是一些空间分布不均匀的点，各个数据分布在不同的经纬度和高度上，因此对所有数据进行网格化处理，即对每个格点的值取 $\pm 1^\circ$ 内所有值的平均值，使之尽可能均匀分布。最终得到中国大陆及邻近地区的卫星网格值，共 5 798 个数据点，图 2 是所选数据点的空间分布图。

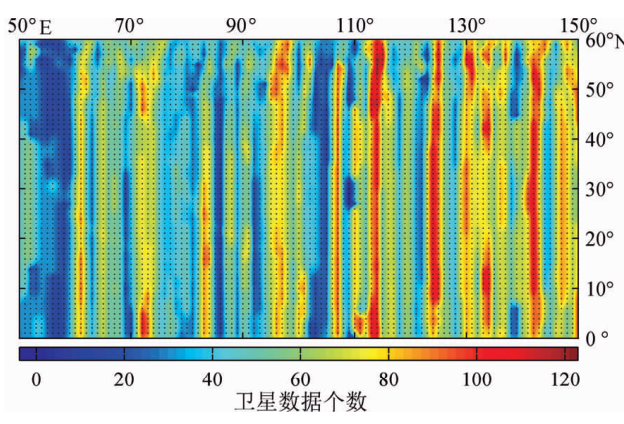


图 2 2008 年筛选后卫星数据空间分布图
Fig. 2 The spatial distribution of selected CHAMP satellite magnetic data in 2008

2 中国及邻区卫星地磁异常

根据上述方法绘制出卫星飞行高度约 330 km 的中国及邻区的卫星磁异常分布图（图 3），显示了较明显的大地构造的磁异常特征：塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地显示强正异常，青藏高原—喜马拉雅造山带和天山造山带—阿尔泰造山带均表现出的强负磁异常。卫星磁异常的分布特征与地质构造有较好的对应关系（李廷栋，2006；袁学诚，1995），研究区内磁异常幅值为 $-8.5 \sim 10$ nT。

由卫星磁异常可以清晰地看到一条正磁异常条带北起松辽盆地,经过华北地台、四川盆地、云南滇西地区,一直往南西方向延伸到印度地台,整个印度地台分布着大面积正异常。4 个正磁异常中心分别位于松辽盆地,异常中心强度 6.5 nT;四川盆地,异常中心强度 6 nT;缅甸西北部(茂叻),异常中心强度 6 nT 和印度西部(巴尔梅尔),异常中心强度 6.5 nT。

另一条明显的负异常条带北起黑龙江省北部漠河,经过蒙古东部、内蒙古鄂尔多斯至青藏高原形成强负异常后,继续向西延伸至伊朗中部亚兹德,该条带有 2 个异常中心,一个位于位于黑龙

江漠河地区,异常中心强度 -5.3 nT,另一个位于青藏高原—喜马拉雅造山带地区,异常中心强度 -6 nT。

塔里木盆地表现为明显的东西向正异常特征,异常中心强度为 9.5 nT,异常向东北方向延伸,经过吐哈盆地至贝加尔地区,向西北延伸至哈萨克地块。塔里木盆地北部的天山地区则表现为负异常,异常向西北延伸,延伸到阿尔泰造山带形成强负磁异常中心,中心强度 -8.5 nT。

另外西伯利亚东部的阿尔丹高原和台湾地区也均表现出正磁异常特征,华夏块体则表现为一个相对较弱的负异常。

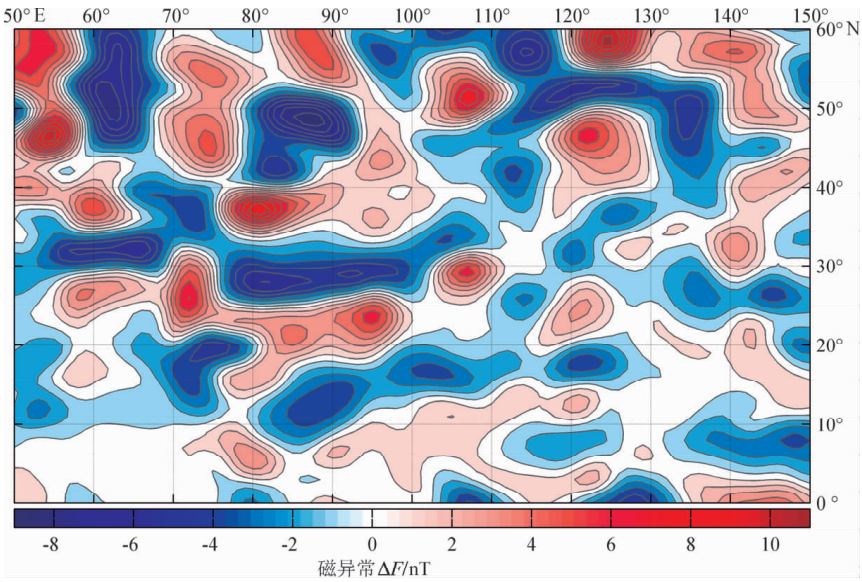


图3 中国及邻区地磁总强度 F 磁异常分布图

Fig. 3 Distribution of the CHAMP satellite geomagnetic total intensity anomalies shown in China and its adjacent areas

3 结论

本研究基于 CHAMP 卫星 2008 年的地磁观测数据,利用国际地磁参考场 IGRF12 和 CHAOS - 6 模型得到了较为可靠的卫星地磁异常。CHAMP 卫星岩石圈磁异常结果清晰地给出了中国及邻区 330 km 高度的地磁异常分布,其中几个较强正异常中心位于松辽盆地、四川盆地、塔里木盆地和印度地台,较强负异常中心位于青藏高原和阿尔泰造山带。330 km 高度的卫星磁异常主要是中长波长成分,反映大尺度的基底构造特征,古老的地台

和巨型盆地有较高的磁化强度,一般正磁异常区,如塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地显示强正异常。造山带和隆起地区有较弱的磁化强度,则一般表现为负磁异常区,如青藏高原—喜马拉雅造山带和天山造山带—阿尔泰造山带均表现出的强负磁异常。

参考文献:

安振昌,马石庄,谭东海. 1992. 中国及邻近地区卫星磁异常的球冠谐和分析[J]. 地球物理学报,35(增刊1):188-197
杜劲松. 2015. 基于球坐标系的卫星磁异常数据处理与正反演方法研究[J]. 测绘学报,44(2):236-236.
冯彦. 2011. 中国大陆地区的岩石圈磁场模拟研究[D]. 南京:南京

- 农业大学.
- 康国发, 高国明, 白春华, 等. 2010. 中国及邻近地区 CHAMP 卫星磁异常的分布特征[J]. 地球物理学报, 53(4): 895–903.
- 李廷栋. 2006. 中国岩石圈构造单元[J]. 中国地质, 33(4): 700–710.
- 徐文耀, 白春华, 康国发. 2008. 地壳磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展, 23(3): 641–651.
- 袁学诚. 1995. 论中国大陆基底构造[J]. 地球物理学报, 38(4): 448–459.
- 张昌达. 2003. 由卫星和航空磁测成果推断中国岩石圈的磁性特征[J]. 地球物理学进展, 18(1): 103–110.
- BLAKELY R J. 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- FINLAY C C, OLSEN N, TØFFNER – CLAUSEN L. 2015. DTU candidate field models for IGRF – 12 and the CHAOS – 5 geomagnetic field model[J]. Earth Planets and Space, 67(1): 114.
- LANGE L R A, HINZE W J. 1998. The magnetic field of the Earth's lithosphere: The satellite perspective[M]. Cambridge U K: Cambridge University Press.
- MANDEA M, PURUCKER M. 2005. Observing, modeling, and interpreting magnetic fields of the solid Earth[J]. Surveys in geophysics, 26(4): 415–459.
- OLSEN N, HULOT G, SABAKA T J. 2010. Measuring the Earth's magnetic field from space: concepts of past, present and future missions[J]. Space science reviews, 155(1): 65–93.

Analysis of the Magnetic Anomalies in China and its Adjacent Areas from the CHAMP Satellite Geomagnetic Total Intensity Data in 2008

WANG Can^{1,2}, YUANG Jiehao¹, WANG Zhendong¹

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(2. *USGS, Menlo park, CA 94025, USA*)

Abstract

The CHAMP satellite mission provided reliable measurements for both global and regional lithospheric magnetic fields. Based on the CHAMP satellite scalar magnetic field data in 2008, we derived the scalar magnetic anomalies in China and its adjacent areas. In order to extract the lithospheric magnetic anomalies, satellite magnetic data was selected to obtain the least – disturbed data, and we chose the satellite observation data through quiet period of magnetic activity based on the magnetic index and local threshold. Then the main magnetic field, magnetospheric field, ionospheric field and induction fields were corrected, and some unrealistic observed data were deleted. The CHAMP magnetic anomalies showed good relationship with the lithospheric structure in China and adjacent areas, the high positive magnetic anomalies are mainly located at the old platform and huge basin areas, such as the Songliao basin, Sichuan basin and Tarim basin, while the negative anomalies located in fold zones, such as Tibet plateau and Altai orogenic belt.

Keywords: lithospheric magnetic field; CHAMP satellite; geomagnetic total intensity; satellite magnetic anomalies; tectonics