

2014年鲁甸6.5级地震相关断裂的岩石圈磁异常分析*

王青华, 陈政宇, 张忠龙, 赵育飞, 顾健

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 使用2014年4月川滇交界东部100个测点的地磁场总强度原始观测数据, 经数据计算消除变化磁场并剥离掉主磁场, 得到岩石圈磁场模型数据。利用重磁勘探系统软件(GMS3.0)对该模型数据进行解析延拓, 分别生成岩石圈磁场的浅表和深部异常, 结合鲁甸6.5级地震的地震序列、震源区的地质资料进行初步分析。结果表明: 莲峰断裂、小江断裂北段切割深度在15 km及以上, 昭通—鲁甸断裂、包谷垭—小河断裂的切割深度均不足15 km。另外, 鲁甸地震余震的空间分布沿包谷垭—小河断裂呈NW向展布, 结合余震的深度, 进一步推测了包谷垭—小河断裂的切割深度约12 km。

关键词: 包谷垭—小河断裂; 地磁场总强度; 地磁测量; 鲁甸地震

中图分类号: P318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)03-0377-05

0 引言

2014年8月3日16时30分, 云南省昭通市鲁甸县(27.1°N, 103.3°E)发生6.5级地震, 震源深度12 km, 发生余震达1 335次。经野外考察, 得到等震线长轴呈NWNW向, 地震主要集中在莲峰至昭通断裂带之间(徐锡伟等, 2014), 余震序列向东南穿过通—鲁甸断裂。此外, 由于震区地表无明显破裂带, 导致当时对鲁甸地震的发震断裂产生了一定的疑问, 后经相关地震台网记录到的余震序列分布及震后科考得到的资料显示, 鲁甸地震发震断层为NW向的包谷垭—小河断裂。包谷垭—小河断裂由数条断续展布的断层组成, 属于昭通—鲁甸断裂的次级断裂(王腾文等, 2015)。其SE起于包谷垭以北的月亮山一带, 向NW经龙头山、乐红、小河、满天星, 止于东坪一带, 总长约40 km(李西, 2015), 呈北西—南东向, 近似垂直于昭通—鲁甸断裂带、莲峰断裂带(房立华等, 2014)。

本文利用2014年4月在川滇交界东部100个测点的地磁场总强度资料, 经地磁日变通化、长期变化改正后, 剥离掉主磁场, 获得该区域岩石圈磁场模型数据。使用重磁勘探系统软件(GMS3.0)对该

数据进行解析延拓, 分别生成岩石圈磁场的浅表和深部异常(倪喆等, 2014a, b)。文中将重点描述莲峰、昭通—鲁甸、包谷垭—小河断裂和小江断裂北段, 以及鲁甸6.5级地震序列的空间分布和震源深度在岩石圈磁场浅表和深部异常中的表现, 进一步探讨上述4个断裂的切割深度和其相互控制作用。

1 数据处理

1.1 数据介绍

2014年4月, 中国地震局地球物理研究所和云南省地震局联合在川滇交界东部建立了地磁场总强度加密测网(26°~28°N, 101°~104°E)。该网由100个测点构成, 测点间距约25 km, 分布均匀。测点周围环境良好, 无电磁干扰。测区内分布的主要断裂有昭通—鲁甸断裂、莲峰断裂、小江断裂、则木河断裂、元谋—绿汁江断裂, 以及鲁甸6.5级地震的发震断裂——包谷垭—小河断裂。图1为川滇交界东部地磁场总强度测点分布情况。同时, 为了提高模型计算精度, 均匀选取测区周边的15个地磁三分量矢量测点作为模型计算时的边界约束。

地磁场总强度测量采用的是“交换同步测量方法”。具体过程如下: 分别使用两台GSM-19T质子

* 收稿日期: 2017-01-21.

基金项目: 《2015.0年代中国地磁参考场编制(20150813)》的协作任务“西南地磁数据收集整理与研究”、《中国综合地球物理场观测—大华北地区(201508009)》的协作任务“大华北地区西南缘地磁观测研究”和李建成院士工作站共同资助。

旋进磁力仪（分辨率 0.01 nT，精度 0.2 nT），即仪器 1 和仪器 2 进行观测。首先，对仪器 1（置于主测点，A 桩）与仪器 2（置于辅助测点，B 桩）同步进行测量，各读取三组，每组 10 个有效观测数据。然后，交换主测点、辅助测点仪器再次进行同步测量，读取三组，每组 10 个有效数据。最后，分别求得每台仪器每组测量的算术平均值 F_{1A} 、 F_{1B} 、 F_{2A} 、 F_{2B} 。

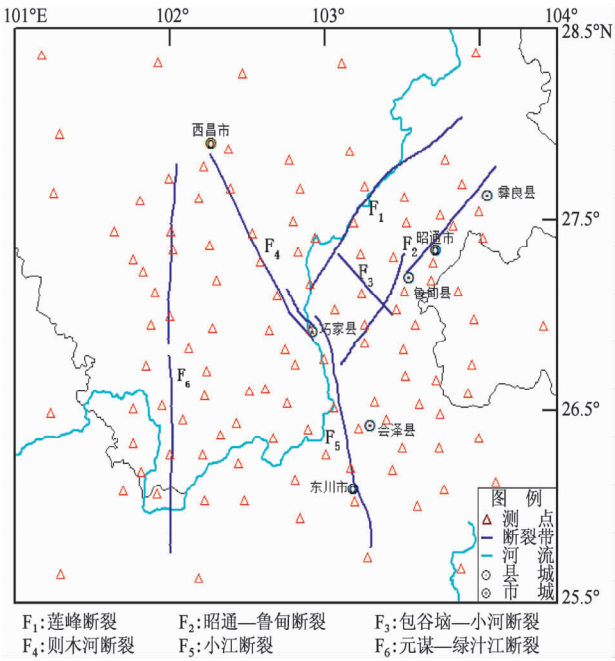


图 1 川滇总强度加密测网测点分布图
Fig. 1 Distribution of the measured points of the total intensity in Sichuan and Yunnan

1.2 数据处理

本文中的地磁场总强度数据的处理过程依次分为 4 个部分进行，分别是地磁日变通化、长期变化改正、主磁场剥离和岩石圈磁场的分离（中国地震局监测预报司，2014）。

(1) 地磁日变通化

为消除野外观测数据中包含的地磁场日变化等外部源场成分，本文采用通海标准地磁台数据的分钟值对野外观测数据进行日变通化：

$$F_p^0 = F_p^t - F_s^t + F_s^0 \tag{1}$$

其中： F_p^0 为测点 P 的地磁测量值经日变通化处理到通化零时的结果数据， F_p^t 为测点 P 在时间 t 时的地磁测量值， F_s^t 为在时间 t 时的通化参考台观测

分钟值数据， F_s^0 为通化参考台在所处时区地方时 00:00 ~ 03:00 的连续观测分钟值数据平均值。

此外，数据通化结束后，通过计算日变通化值均方差检核判断地磁观测数据日变通化处理有效性和可信度。地磁场总强度、磁偏角和磁倾角日变通化的均方误差应不超过 1.5 nT、0.5' 和 0.3'，均方差计算如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(F_i^0 - \sum_{i=1}^n \frac{F_i^0}{n} \right)^2}{n-1}} \tag{2}$$

其中： σ 为日变通化值均方差， F_i^0 为某测点第 i 个经日变通化处理到通化零时的结果数据， n 为该测点地磁测量组数。

(2) 长期变化改正

观测数据在进行地磁日变通化之后，还需消除观测数据中所包含的地球主磁场长期变化成分。本文选用 1995.0—2015.0 年中国地区地磁场非线性变化模型（NOC）对日变通化后的数据进行长期变改正（顾左文等，2006；陈斌等，2011），将日变改正后数据统一归算至 2015.0 地磁标准年代。长期变化改正由下式得到：

$$F_p^{sv} = F_p^0 - \Delta_p^{sv} \tag{3}$$

其中： F_p^{sv} 为测点 P 上经过长期变化改正到标准地磁年代的结果数据， F_p^0 为测点 P 经日变通化处理到通化零时的测量通化值， Δ_p^{sv} 为测点 P 处地磁场长期变化改正参考数值。

(3) 主磁场剥离

地磁内源场由主磁场与岩石圈磁场组成。获取岩石圈磁场需要从地磁内源场中剥离掉核幔边界磁流体主磁场。本文选取第 12 代国际地磁参考场模型（IGRF12）来获取地磁主磁场数据。在进行（1）、（2）步骤后，由地磁长期变改正数据减掉相同空间坐标主磁场数据，得到岩石圈磁场模型数据。具体计算公式为：

$$F_p^a = F_p^{sv} - F_p^n \tag{4}$$

其中： F_p^{sv} 为测点 P 上经过长期变化改正到标准地磁年代的结果数据， F_p^a 为测点 P 经地磁正常场剥离后所获得的异常场数值， F_p^n 为测点 P 处的地磁正常场参考数值。

(4) 解析延拓

重磁勘探软件系统（GMS3.0）是在原国家高技术研究发展计划（863）“海洋深部地壳结构探测技术”（820-01-03）课题的基础上，针对地面重磁勘探资料处理解释，以及固体矿产勘探重新研究与编制的专业性重磁数据处理软件。本文主要利用 GMS3.0 软件系统对岩石圈磁场异常模型进行向上延拓，分离成岩石圈磁场异常浅表部分与深部部分。根据以往的经验，选取 15 km 为深部和浅表的分界线。即浅表异常深度为 0 ~ 15 km，深部异常深度大于 15 km。同时利用 ModelVision11.0 软件生成上述 2 种异常的伪彩色图像，提高数据视觉效果。

2 异常分析

本文先对浅表和深部异常图像进行特征描述，再将莲峰、昭通—鲁甸、包谷垭—小河断裂及小江断裂北端、鲁甸 6.5 级地震序列的空间分布和震源深度投到异常图像上，进行相关的磁学解释。

图 2、3 为川滇交界东部岩石圈磁场深部异常和浅表异常图。从图 2 可以看出，川滇交界的西北部为岩石圈磁场的负异常区域，南部、东部主要以正异常为主，深部正负异常范围广，且正负交界处异常转换平缓，表明在地表以下 15 km 及其以上的岩石磁性介质分布均匀、结构单一。与图 2 相比，图 3 中岩石圈磁场浅表异常的正负区域大致均衡，且正负异常区相互交错，表明在地表 0 ~ 15 km 的岩石圈磁性介质分布不均匀、结构复杂。

本文进行解析延拓时，选取 15 km 为分界线，深部异常表现的是 15 km 以下岩石圈介质的磁性分布，浅表异常表现的是 0 ~ 15 km 以内岩石圈介质的磁性分布。

从图 2 与图 3 中可看到，莲峰断裂和小江断裂北段的走向位于深部和浅表异常的正负交界区域。袁炳强和张春灌（2015）的研究表明断裂带两侧岩石磁性不一致而引起磁异常。因此，莲峰断裂的东南与西北、小江断裂北段的西与东分别是深部异常的正和负，故认为断莲峰断裂和小江断裂北段的切割深度大于 15 km。

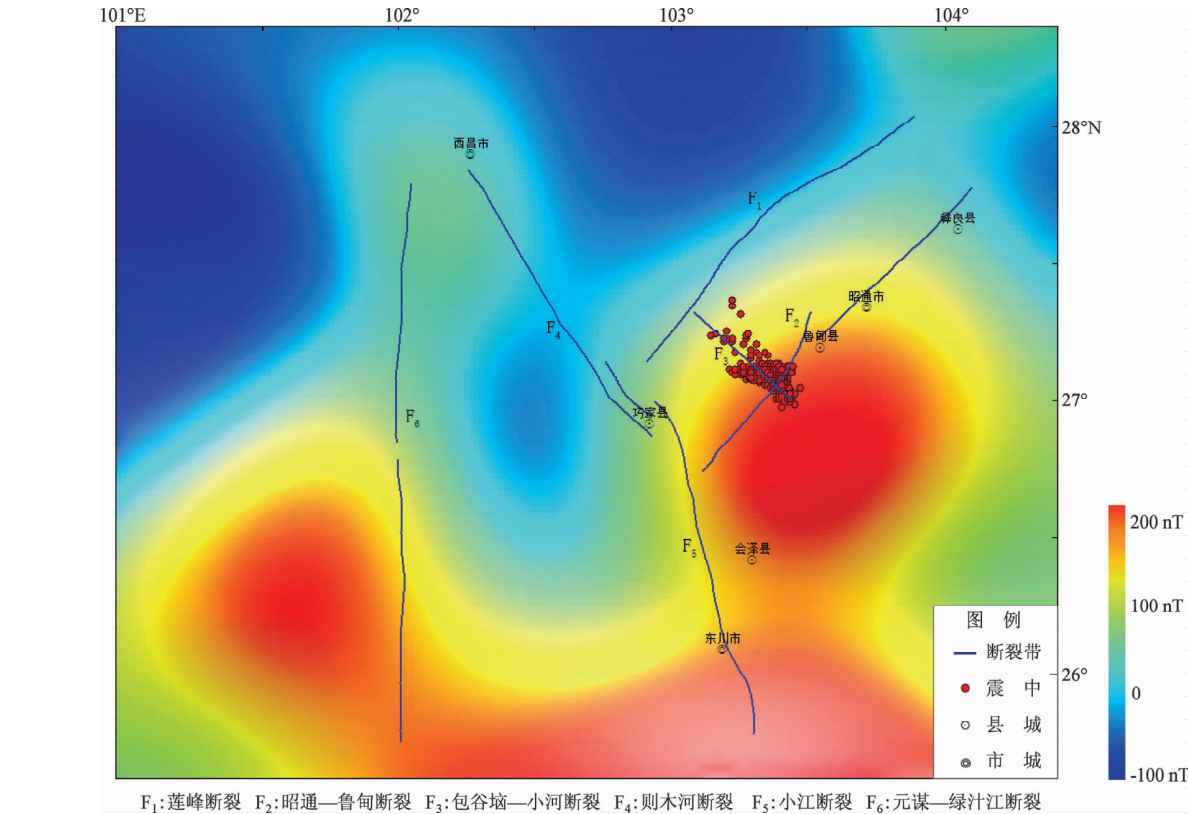


图 2 2014 年川滇交界东部岩石圈磁场深部异常图（蓝色：负异常；红色：正异常）

Fig. 2 Deep magnetic anomaly in the eastern part of the junction of Sichuan and Yunnan in 2014 (blue: negative anomalies; red: positive anomalies)

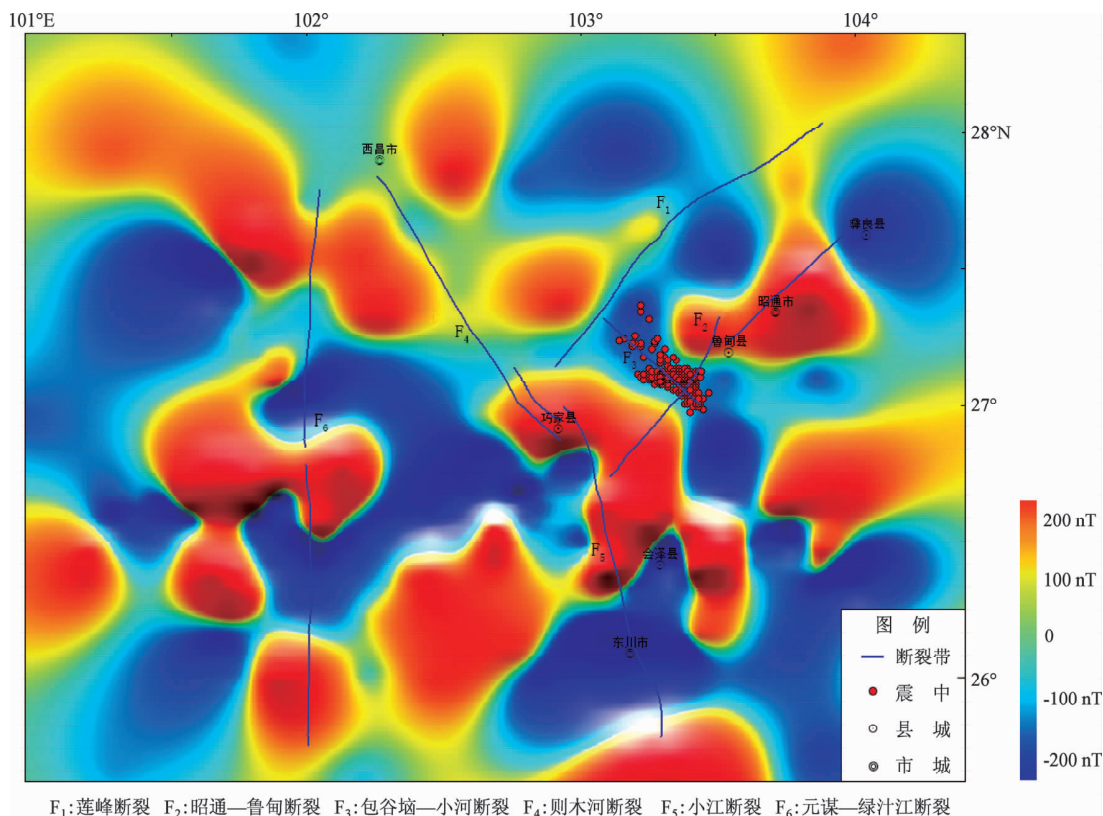


图 3 2014 年川滇交界东部岩石圈磁场浅表异常图

Fig. 3 Shallow magnetic anomaly in the eastern part of the junction of Sichuan and Yunnan in 2014

昭通—鲁甸断裂在深部异常上表现为横切了正异常,沿该断裂走向的两侧均处于深部正异常当中。说明该断裂在 15 km 及其以上的岩石圈介质磁性表现一致,其切割深度应不足 15 km。另外,昭通—鲁甸断裂的走向在浅表异常上既有正异常区域,也有负异常区域,沿该断裂走向两侧的磁异常不明显。故表明该断裂在地表以下 0 ~ 15 km 的范围内,顺其该断裂走向的每一段的切割深度都不一致。

包谷垭—小河断裂与昭通—鲁甸断裂在深部异常中的表现一样,断裂走向的两侧均处于深部正异常之中,说明该断裂的切割深度也不足 15 km。进一步研究发现,包谷垭—小河断裂即在深部异常中的正异常区域内,也在浅表异常中的负异常区内。表明该断裂走向在 0 ~ 15 km 和 15 km 以上的深度其岩石圈介质磁性存在分层差异。对于这种差异性,以现有的理解使我们无法推断出包谷垭—小河断裂的具体切割深度。然而,鲁甸 6.5 级地震的余震序列给了我们新的认识。从 2014 年 8 月 3 日至 11 月 20 日,鲁甸地震序列发生 $M \geq 2.8$ 地震 28 次,其中 2.8 ~ 2.9 级 8 次、3.0 ~ 3.9

级 13 次、4.0 ~ 4.9 级 6 次、5.0 ~ 5.9 级 0 次、6.0 ~ 6.9 级 1 次。鲁甸地震主震为 6.5 级,震源深度为 12 km;余震沿包谷垭—小河断裂呈北西向展布,其深度主要分布在 4 ~ 12 km,其中震源最深的为 14.6 km,对应震级为 3.3 级。根据岩石圈磁场深部、浅表异常所推测包谷垭—小河断裂切割深度应不足 15 km,再结合余震的震源深度 4 ~ 12 km,因此我们认为包谷垭—小河断裂的切割深度应在 12 km 左右。

3 结论和讨论

本文利用川滇交界东部岩石圈磁场的深部异常和浅表异常,以及地震序列资料对鲁甸 6.5 级地震震源区周边的相关断层进行了地球物理方面的综合解释,得到了以下 2 点初步认识:

(1) 从岩石圈磁场深部异常和浅表异常图像中推断出:莲峰断裂、小江断裂北端的地表下切割深度在 15 km 及以上,昭通—鲁甸断裂的切割深度不足 15 km。

(2) 依据包谷垭—小河断裂在岩石圈磁场的

深部异常与浅表异常的表现形式,推断出该断裂的切割深度与昭通—鲁甸断裂一样,其切割深度不足15 km。再结合鲁甸6.5级地震余震序列的震源深度,进一步推测了包谷垭—小河断裂的切割深度应在12 km左右。

从本文的分析中可以看到,通过一次性的地磁场总强度观测所获得的岩石圈磁场异常分布空间,可以清晰的认识已知或未知断裂带,尤其是类似于包谷垭—小河断裂带这样的次生断裂在磁学上的表现特性。再结合测震、地震地质进行相应的物理上的综合分析,进一步能清晰的搞清相关构造的物性,将来可为地震预测预报的研究工作提供必要的基础信息和更加全面精准的研判资料,从而推动地震预报工作的进一步发展。

本文在撰写过程中,中国地震局地球物理研究所顾左文研究员、云南省地震局倪喆高级工程师给予了大力的支持,在此一并表示感谢。

参考文献:

陈斌,顾左文,狄传芝,等. 2011. 2009~2010年大华北岩石圈磁异常分布及其变化特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 33(5): 548–553.

房立华,吴建平,王未来,等. 2014. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震余震重定位及其发震构造[J]. 地震地质, 36(4): 1173–1185.

顾左文,张毅,姚同起,等. 2006. 九江—瑞昌. $M_s5.7$ 地震地磁异常的观测与分析[J]. 地震学报, 28(6): 611–211.

李西. 2015. 川滇地块云南地区不同发育阶段边界断裂破裂特征研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.

刘丽芳,徐甫坤. 2014. 利用精确定位余震资料确定2014年云南鲁甸6.5级地震的断层参数[J]. 地震研究, 37(4): 489–494.

倪喆,陈双贵,袁洁浩,等. 2014a. 芦山7.0级地震前后岩石圈磁场异常变化研究[J]. 地震研究, 37(1): 61–65.

倪喆,袁洁浩,王黎,等. 2014b. 2014年云南鲁甸6.5级、永善5.0级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析[J]. 地震研究, 37(4): 537–541.

倪喆. 2014. 洱源5.5级地震前后地磁场变化异常特征分析[J]. 地震研究, 37(3): 426–432.

王腾文,李勇,李敬波,等. 2015. 包谷垭—小河断裂——2014年8月3日云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震发震构造[J]. 防灾科技学院学报, 17(2): 1–7.

徐锡伟,江国焰,于贵华,等. 2014. 鲁甸6.5级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报, 57(9): 3060–3068.

袁炳强,张春灌. 2015. 重磁勘探[M]. 北京:石油工业出版社.

张彦琪,李西,谢英情,等. 2016. 以鲁甸地震和彝良地震为例分析云南昭通地质构造与地震灾害特点[J]. 地震研究, 39(2): 270–278.

中国地震局监测预报司. 2014. 流动地磁测量基本技术要求[P]. 北京:中国地震局.

Lithosphere Magnetic Anomaly Analysis of Related Faults of the 2014 Ludian $M_s6.5$ Earthquake

WANG Qinghua, CHEN Zhengyu, ZHANG Zhonglong, ZHAO Yufei, GU Jian
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, the original observation data of 100 points of total geomagnetic field at the junction in eastern ward of Sichuan and Yunnan are obtained in April, 2014. The data is calculated through eliminating the changing magnetic field and stripping off the main magnetic field, and the magnetic field model data of lithosphere is received. Then the GMS3.0 software is used to analyze the model data, and the shallow and deep anomalies of the lithospheric magnetic field are generated, respectively. Combined the seismic sequence characteristics and geological data of the Ludian $M6.5$ earthquake, it shows that: the Lianfeng fault and north section of the Xiaojiang fault's cut a depth of 15 km and above, while the Zhaotong-Ludian fault cut a depth of less than 15km. In addition, the spatial distribution of the Ludian afterchocks is along NW, and considering the aftershocks depth, It shows that the Baogunao-Xiaohe fault cut a depth of about 12km.

Keywords: Baogunao-Xiaohe Fault; total intensity of geomagnetism; geomagnetic survey; the Ludian earthquake