

云南地区岩石圈磁场特征及震磁特性^{*}

杨学慧¹, 王赞辉¹, 姚休义²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 云南财经大学 巨灾风险管理研究中心, 云南 昆明 650221)

摘要: 利用 NGDC-720 模型计算云南地区岩石圈磁场 X , Y , Z 分量, 分析岩石圈磁场分布特征, 并从空间分布及强度统计两方面研究 1970—2019 年云南省内 31 次 $M_s \geq 6.0$ 地震与岩石圈磁场分布之间的关系。结果表明: 云南地区主要断裂的展布与岩石圈磁场分布有着较好的对应关系, 且研究区内 $M_s \geq 6.0$ 地震大多分布在负值异常区或正负异常区的分界处。

关键词: NGDC-720 模型; 岩石圈磁场; 震磁特性; 正负异常区

中图分类号: P315.721

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0745-06

0 引言

岩石圈磁场 (Lithospheric Magnetic Field, 简称 LMF), 又名地磁异常场, 作为地磁场的一个重要组成部分, 其空间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的影响 (徐文耀, 2009)。LMF 极其稳定, 其变化的时间尺度以百万年量级计算, 但在一些地质活动剧烈时期, 局部地区的岩石圈磁场则可能发生快速变化, 如火山活动以及地震的孕育和发生等 (李莎, 康国发, 2014)。

近年来, 关于地磁异常的研究一部分集中在利用模型数据分析全球或亚洲地区等大区域范围, 如徐文耀等 (2000) 以第十代国际参考地磁场 (IGRF10) 为背景, 研究了 20 世纪的全球大尺度地磁异常的深部磁场的结构特点; 康国发等 (2002) 以 Bloxham 和 Jackson (1992) 给出的 BJ 模型, 计算和分析 1690 年以来地表非偶极子磁场垂直分量的异常变化; 康国发等 (2010) 利用 Champ 卫星资料分析了中国及其邻区磁异常的分布特征。另一部分研究主要针对局部小范围区域的地磁场长期变化和区域性磁异常, 如董学斌等 (1980) 利用 1970 年中国地磁图及正常磁场模型研究了我国东北地区大地磁异常; 顾左文等 (2004) 以球冠谐模型研究了京津

冀地区的地磁异常; 张昌达 (2002, 2009) 对西藏高原地壳的磁性特征及南中国海的 2 个磁异常开展研究。还有部分学者利用固定观测台站, 通过地磁加卸载响应比、逐日比异常、谐波振幅比等方法开展研究 (冯志生等, 2006; 李霞等, 2016; 倪晓寅, 2017; 李鸿宇等, 2013), 分析得出中强地震前出现地磁异常变化。

由于前人研究中磁场模型所使用的资料陈旧或不够系统, 且受限于横向分辨率 ($\lambda = \frac{2\pi R_E}{n}$), 故现行大部分卫星磁场模型阶数较低 ($n \leq 300$)。NGDC-720 模型是由地面、航空、海洋和卫星磁测数据综合汇编而成, 是利用球谐分析法描述岩石圈磁场精度最高的模型之一 (焦立果, 2014), 模型的建立过程中使用了经扫描数字化后的中国大陆地区航磁图数据。该模型提供了 n 为 16 ~ 720 阶球谐级数展开来表示地壳场, 对应于 56 ~ 2 500 km 的空间波长范围 (冯丽丽等, 2015), 具有极高的空间分辨率, 适用于描述地壳磁异常、推测岩石圈的组成和结构 (黄晓颖, 边少锋, 2010), 为建立高精度地壳磁场模型提供了基础 (王慧琳等, 2008)。

地震活动性与地磁异常之间存在着一定的相关性。随着 LMF 的建模和广泛应用, 将其应用于地震活动的研究中, 尤其是通过地磁异常区寻找潜在震源区, 可提升对多震地区地磁异常区的认

^{*} 收稿日期: 2020-04-13.

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1503806) 及中国地震局监测预报司 2020 年度震情跟踪定向工作任务 (2020010425) 联合资助。

识,为实际地震预测工作提供一定的决策依据。云南地区位于青藏高原的东南边缘,是印度板块与欧亚大陆北东向碰撞挤压的前沿地带和深部物质逃逸地带,同时也是青藏高原与扬子地块、印支地块交接的过渡地带,地质造复杂、地震频发。本文利用 NGDC-720 模型,分析云南地区岩石圈磁场分布特征,及其与研究研究区内 $M_s \geq 6.0$ 地震之间的关系。

1 资料处理

1.1 地震目录选取

选取 1970—2019 年震中位于云南省范围内 ($20^{\circ} \sim 30^{\circ}N$, $97^{\circ} \sim 107^{\circ}E$) 的 $M_s \geq 6.0$ 地震共计 31 个,并统计了这些地震震中的岩石圈磁场强度以及岩石圈磁场分布特征,见表 1。

表 1 1970—2019 年云南地区 $M_s \geq 6.0$ 地震目录及各分量岩石圈磁场强度

Tab. 1 Catalogue of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Yunnan area from 1970 to 2019 and magnetic field strength of the lithosphere in various components

序号	发震日期	发震位置		M_s	参考地点	X/nT	Y/nT	Z/nT	展布特征
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$						
1	1970-01-05	24.2	102.6	7.8	通海	-0.28	10.81	-53.31	X, Z 负
2	1970-02-07	23	101	6.2	普洱	-0.60	-16.93	-38.01	负
3	1971-04-28	23	101.1	6.7	普洱	-0.60	-12.64	-32.32	负
4	1971-09-14	23	100.8	6.2	普洱	-0.62	-36.16	-39.55	负
5	1973-08-16	23.1	101.2	6.3	普洱	-0.59	-9.05	-24.91	负
6	1974-05-11	28.2	104.1	7.1	大关	-1.10	-6.34	-7.19	负
7	1976-05-29	24.5	99	7.3	龙陵	-0.55	-32.65	-11.19	负
8	1976-05-29	24.6	98.7	7.4	龙陵	-0.70	-47.57	-9.33	负
9	1976-05-31	24.3	98.7	6.5	潞西	-0.69	-42.84	10.54	Z 正负交界
10	1976-06-01	24.2	98.7	6	潞西	-0.72	-37.43	15.07	X, Y 负
11	1976-06-09	24.8	98.7	6.2	腾冲	-0.71	-56.96	-4.42	负
12	1976-07-04	24.3	98.8	6	潞西	-0.62	-45.43	-0.61	负
13	1976-07-21	24.8	98.7	6.6	腾冲	-0.65	-56.96	-4.42	负
14	1979-03-15	23.2	101.1	6.8	普洱	-0.60	-11.40	-39.43	负
15	1981-09-19	22.9	101.3	6	普洱	-0.55	-12.44	-41.62	负
16	1985-04-18	25.8	102.8	6.2	禄劝	-0.71	34.09	-11.74	X, Z 负
17	1988-11-06	22.5	100	7.4	澜沧	-0.81	-23.76	26.16	X, Y 负
18	1988-11-06	23.2	99.3	7.2	耿马	-0.62	-4.54	32.82	X, Y 负
19	1993-01-27	23.1	101.1	6.3	普洱	-0.60	-8.62	-34.43	负
20	1995-10-24	25.9	102.2	6.5	武定	-0.91	-8.19	44.10	X, Y 负
21	1996-02-03	27.2	100.3	7	丽江	-0.26	-67.04	0.40	Z 正负交界
22	1998-11-19	27.3	100.9	6.2	宁蒗	0.03	47.05	6.14	Z 正负交界
23	2000-01-15	25.5	101.1	6.5	姚安	-0.56	-18.07	-82.02	负
24	2001-10-27	26.2	100.6	6	永胜	-0.31	-11.09	30.19	X, Y 负
25	2003-07-21	26	101.2	6.2	大姚	-0.79	-21.42	21.78	X, Y 负
26	2003-10-16	26	101.3	6.1	大姚	-0.81	-25.08	-9.30	负
27	2007-06-03	23	101.1	6.4	宁洱	-0.60	-12.64	-32.32	负
28	2009-07-09	25.6	101.1	6	姚安	-0.66	-39.59	-86.50	负
29	2014-05-30	25.0	97.9	6.1	盈江	-1.09	-62.91	67.49	X, Y 负
30	2014-08-03	27.1	103.3	6.5	鲁甸	-0.18	66.38	-27.99	X, Z 负
31	2014-10-07	23.4	100.5	6.6	景谷	-0.70	-18.41	12.300	Z 正负交界

1.2 NGDC-720 模型计算岩石圈磁场

在地磁观测中,主磁场和地壳磁场叠加在一起,理论上还无法将它们完全分离,但是根据地磁场能谱随谐波阶次的变化规律,通常认为球谐阶次 $n < 13$ 阶为地核场, $n = 14 \sim 15$ 阶是地核和地壳磁场的过渡, $n > 16$ 阶为地壳磁场,为地壳磁场定量计算提供了依据。在地心坐标系下计算各个地磁要素值。根据地磁场位函数理论,地磁位的球谐级数为:

$$U(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left\{ \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \left[g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda \right] \right\} P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

式中: λ 和 θ 分别为经度和余纬; a 是地球半径,计算中取 6 371.2 km; $g_n^m(t)$ 和 $h_n^m(t)$ 是地磁位的球谐系数; $P_n^m(\cos \theta)$ 是 n 阶 m 次施密特标准正交缔合勒让德函数。

在球坐标系下,地磁场北向分量 X 、东向分量 Y 和垂直分量 Z 可以根据位函数求导得到:

$$X(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \quad (2)$$

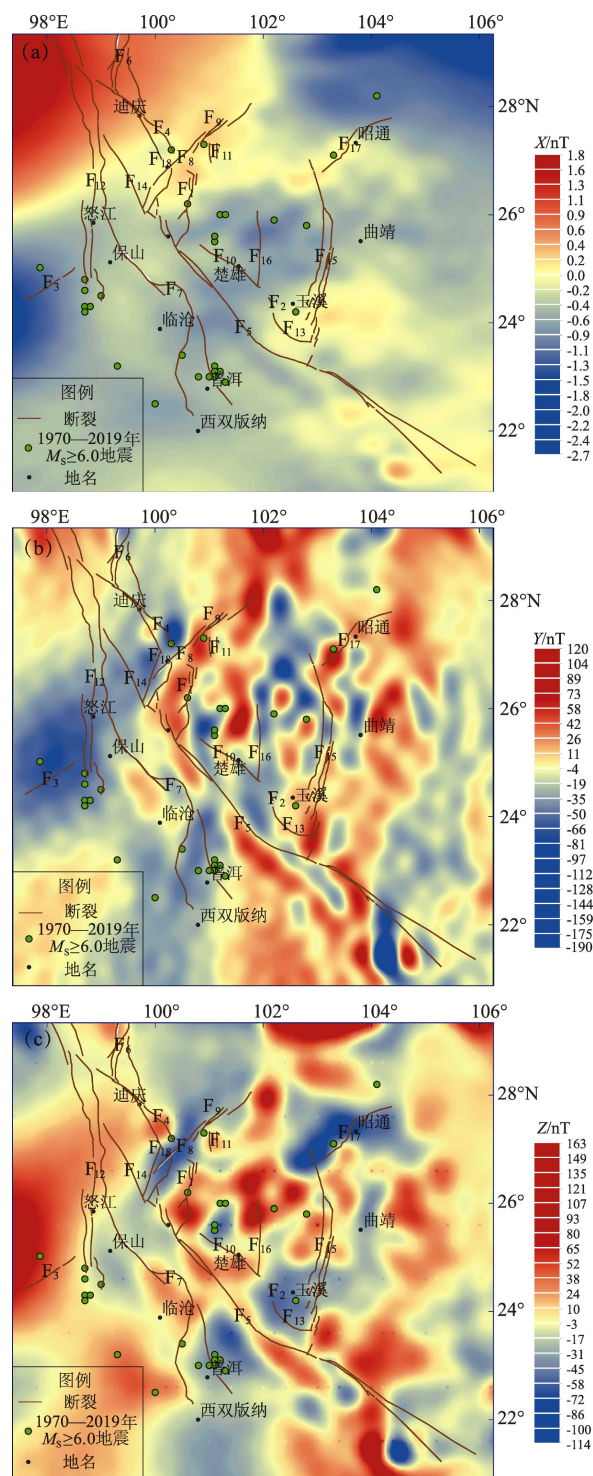
$$Y(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) \frac{m}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) \quad (3)$$

$$Z(\theta, \lambda) = - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1) (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (4)$$

NGDC-720 地磁场模型以球谐分析系数 (g , h) 的形式给出,本文以 0.05° 为网格间距,按照云南省的经纬度要求计算磁场模型数据。

2 云南地区岩石圈磁场分布特征

由于正负异常交界区没有明确的定义,本文参考顾春雷 (2010) 以零值线 30 km 缓冲区为零值线附近区域的研究思路,以研究区内岩石圈磁场强度变化总量的 5% 为缓冲区定义为正负异常分界区,即 $-0.13 \text{ nT} \leq X \leq 0.13 \text{ nT}$, $-10.08 \text{ nT} \leq Y \leq 10.08 \text{ nT}$, $-14.11 \text{ nT} \leq Z \leq 14.11 \text{ nT}$ 。



F₁: 程海断裂; F₂: 楚雄—建水断裂; F₃: 大盈江断裂; F₄: 德钦—中甸断裂; F₅: 红河断裂; F₆: 金沙江断裂; F₇: 澜沧江断裂; F₈: 丽江—小金河断裂; F₉: 丽江断裂; F₁₀: 南华—楚雄断裂; F₁₁: 宁蒗断裂; F₁₂: 怒江断裂; F₁₃: 石屏—建水断裂; F₁₄: 维西—乔后断裂; F₁₅: 小江断裂; F₁₆: 元谋断裂; F₁₇: 昭通—鲁甸断裂; F₁₈: 中甸—乔后断裂

图1 云南地区岩石圈磁场 X 分量 (a), Y 分量 (b), Z 分量 (c) 异常分布

Fig. 1 Distribution of lithosphere magnetic fields of X (a), Y (b) and Z (c) components in Yunnan area

2.1 X 分量异常

由图 1a 可见, 云南地区 X 分量整体强度较小, 介于 $-1.55 \sim 1.11 \text{ nT}$ 。 X 分量在云南大部分地区都呈现出磁负异常现象。负异常以滇西南、滇南地区为主, 呈现为广阔宽缓的弱负异常区, 极值位于滇西大盈江断裂附近, 第二大负异常地区分布于滇东北的昭通—鲁甸断裂附近。滇西北区域出现明显的正异常, 主要延伸至德钦断裂、中甸—乔后断裂、金沙江断裂、怒江断裂附近, 极值分布于怒江断裂附近, 幅度达 1.11 nT ; 滇南地区也呈现有小部分正异常, 主要位于小江断裂南段、曲江断裂附近, 幅度约为 0.03 nT 。

2.2 Y 分量异常

从图 1b 可见, Y 分量强度介于 $-96.57 \sim 105.08 \text{ nT}$, 其异常分布呈现出较明显的西负东正的现象, 以丽江—小金河断裂至红河断裂为界, 负异常主要集中在滇西、滇西南及滇西北的中甸、丽江地区。最显著的负异常分布于滇西怒江断裂西支附近, 极值为 -96.57 nT ; 正异常主要分布在界线以东和东北地区, 包含了部分滇西北地区, 最大幅度达 105.8 nT 。各异常区较分散, 相互联系不多, 正负异常分界较明显, 区内较为活跃的小江断裂、丽江—小金河断裂、红河断裂、昭通断裂的走向与正异常区的展布较一致。

2.3 Z 分量异常

由图 1c 可见, 云南地区 Z 分量强度介于 $-139 \sim 43.27 \text{ nT}$, 存在 5 个较为明显的负异常区, 与区内主要断裂的分布有较明显的相关性, 分别为: 以丽江—小金河断裂、维西—乔后断裂、澜沧江断裂为主的滇西北地区, 南华—楚雄断裂附近区域, 普洱断裂、澜沧江断裂附近区域, 石屏—建水断裂、小江断裂一带, 以及昭通—鲁甸断裂附近区域。负异常极值出现在昭通—鲁甸断裂附近, 幅度达 -139 nT 。小江断裂穿越了正异常区和负异常区, 说明这 2 个异常区的基底性质存在巨大差异, 南华—楚雄断裂附近的负异常区被包围在正异常区中, 形成一个孤岛, 地震活动较为剧烈, 该区域的大姚、姚安历史上曾发生多次 $M_s \geq 6.0$ 地震。

3 强震的磁异常特性分析

3.1 空间展布特征

如图 1b, c 所示, 1970—2019 年的 $M_s \geq 6.0$

地震大多发生在丽江—小金河断裂、普洱断裂、南华—楚雄断裂、小江断裂、曲江断裂、昭通断裂、龙陵—瑞丽断裂、程海断裂附近的 Y, Z 分量负异常区内, 部分地震位于 Z 分量正负交界区。大多数地震的震中位置均有 2 个以上分量为负值, 而 1998 年宁蒗 6.2 级地震显得较为特殊, 其震中附近的岩石圈磁场三分量均为正值。

3.2 岩石圈磁场强度

由表 1 可见, 96.77% 的地震发生在 X 分量负异常区内, 87.1% 发生在 Y 分量负异常区内, 77.4% 发生在 Z 分量负异常区及正负异常分界处。

云南地区岩石圈磁场强度极值情况见表 2, 其中, 平均强度为磁场强度取绝对值后取平均得出。表 2 显示, X 分量正异常最大值位于怒江断裂附近、与西藏交界地区, 强度为 1.11 nT , 负异常最大值在龙陵—瑞丽断裂与缅甸接壤区域, 强度为 -1.55 nT ; Y 分量正异常最大值在大姚附近, 强度为 105.08 nT , 负异常最大值位于丽江—小金河断裂与德钦—中甸断裂交界区域, 强度为 -96.57 nT ; Z 分量正异常最大值位于元谋断裂北段, 强度达 143.27 nT , 负异常最大值位于昭通—鲁甸断裂, 强度高达 -139 nT , 该负异常区内曾发生过 1974 年大关 7.1 级地震。

综合表 1, 2 可以看出, 强震震中位置的岩石圈磁场强度大多远远低于最大正异常值或者最大负异常值, 发震位置均不在区域岩石圈磁场强度最强处。

表 2 云南地区岩石圈磁场强度极值

Tab. 2 The extreme value of the magnetic field strength of the lithosphere in Yunnan area

岩石圈磁场分量	磁场强度 极值/nT	平均强 度/nT	$\varphi_N /$ ($^{\circ}$)	$\lambda_E /$ ($^{\circ}$)
X	正异常最大值	1.11	0.41	28.35
	负异常最大值	-1.55	-0.55	23.95
	平均强度	0.54	—	98.25
Y	正异常最大值	105.08	21.51	25.7
	负异常最大值	-96.57	-25.97	27.4
	平均强度	24.31	—	101.55
Z	正异常最大值	143.27	27.72	25.75
	负异常最大值	-139.00	-27.04	27.4
	平均强度	27.36	—	103.5

4 结论

本文利用 NGDC-720 模型, 分析了云南地区岩石圈磁场分布特征, 并从空间分布及强度统计两方面探讨了研究区内 $M_s \geq 6.0$ 地震震中位置与岩石圈磁场分布之间的关系, 结果发现云南地区主要断裂的展布与岩石圈磁场分布有着较好的对应关系, 红河断裂作为云南省境内主要的深大断裂, 主要位于 Z 分量负异常区及正、负磁异常分界线附近, 维西—乔后断裂、石屏—建水断裂、曲江断裂、丽江—小金河断裂、南华—楚雄断裂、昭通—鲁甸断裂、小江断裂大部分、普洱断裂则位于 Y, Z 分量负异常区内。

1970—2019 年云南地区发生的 $M_s \geq 6.0$ 强震与岩石圈磁场的关系研究表明, 强震发生在负异常区及正负分界处的概率远高于正异常区, 且不在磁场强度最强处。而宁蒗 6.2 级地震震中距小金河—丽江断裂仅有 17 km, 震中附近区域的 3 个岩石圈磁场分量却均为正值, 与本次研究的结论不一致, 考虑到该地震的震中位置为云南与四川交界处, 下一步可扩大研究范围至川滇地区, 作进一步研究。

在本次研究中, <https://geomag.us/models/ngdc720.html> 提供了磁场模型球谐分析系数, 中国地震台网中心提供了地震目录, 以及在数据处理前期作出贡献的单位和个人, 在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- 董学斌, 周南硕, 丁凤仪. 1980. 东北地区大地磁异常的初步研究[J]. 长春地质学院学报, (1): 81-93, 75.
- 冯丽丽, 王桢, 陈斌, 等. 2015. 基于 MF6、EMM2010 和 CGRF2010 模型的中国大陆地壳磁异常特征[J]. 地震学报, 37(6): 997-1010.

- 冯志生, 范桂英, 居海华, 等. 2006. 江苏及周边地区中强震电磁异常综合特征分析[J]. 华南地震, 33(3): 9-15.
- 顾春雷. 2010. 区域地磁异常与地震关系研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 36-38.
- 顾左文, 安振昌, 高金田, 等. 2004. 京津冀地区地磁场球冠谐分析[J]. 地球物理学报, 47(6): 1003-1008.
- 郭明瑞, 胡久常, 马龙, 等. 2018. 甘肃岷县 6.6 级地震前地磁垂直分量日变“双低点”异常[J]. 华南地震, 38(3): 39-44.
- 黄晓颖, 边少锋. 2010. 国际高精度地磁模型研究进展[J]. 海洋测绘, 30(3): 79-82.
- 焦立果. 2014. 由卫星岩石圈磁场研究地震活动性及居里面反演[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 14-15.
- 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.
- 康国发, 吴小平, 胡家富. 2002. 1690 年以来全球非偶极子磁场的变化特征[J]. 地球物理学进展, 17(4): 697-702.
- 李鸿宇, 朱培育, 王维, 等. 2018. 2013 年前郭 5.8 级震群的地磁多方法异常分析[J]. 地震研究, 41(1): 111-117.
- 李莎, 康国发. 2014. 蒙古及邻区内源磁场基本特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 36(3): 371-377.
- 李霞, 刘磊, 冯丽丽. 2016. 2016 年青海门源 6.4 级地震前地磁异常特征分析[J]. 地震研究, 39(增刊 1): 122-127.
- 倪晓寅, 陈莹. 2017. 强震前短周期地磁谐波振幅比变化特征[J]. 地震研究, 40(3): 431-436.
- 倪晓寅, 郭雨帆, 谢小玲, 等. 2018. 华南地区地磁加卸载响应比异常指标[J]. 华南地震, 38(4): 22-28.
- 汤筱麒, 陈政宇, 赵育飞, 等. 2019. 2010—2017 年甘川交界地震前震磁异常特征分析[J]. 华南地震, 39(4): 69-74.
- 王慧琳, 陈超, 张昌达. 2008. 最新的岩石圈磁场模型及中国磁异常特征的几点认识[J]. 地学前缘, 15(3): 64-71.
- 徐文耀, 魏自刚, 马石庄. 2000. 20 世纪地磁场的剧烈变化[J]. 科学通报, 45(14): 1563-1566.
- 徐文耀. 2009. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 32-33.
- 张昌达. 2002. 由卫星磁异常推断西藏高原地壳的磁性特征[J]. 地球物理学进展, 17(2): 325-330.
- 张昌达. 2009. 最新的岩石圈磁场模型[J]. 物探与化探, 33(1): 3-7.
- Bloxham J, Jackson A. 1992. Time-dependent mapping of the magnetic field at the core-mantle boundary[J]. J Geophys Res, 97: 19537-19563.

Characteristics of Lithospheric Magnetic Field and Seismomagnetic Characteristics in Yunnan Area

YANG Xuehui¹, WANG Yunhui¹, YAO Xiuyi²

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Catastrophic Risk Management Research Center, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, Yunnan, China*)

Abstract

Firstly, using the NGDC-720 model, we calculated the X , Y , Z components of the lithospheric magnetic field in Yunnan area, and analyzed the distribution characteristics of the lithospheric magnetic field. Then, we studied the relationship between the epicentral location of the 31 $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Yunnan Province from 1970 to 2019 and the distribution of the lithospheric magnetic field from two aspects of spatial distribution and intensity statistics. The results show that the distribution of major faults in Yunnan area has a good correspondence with the distribution of the lithospheric magnetic field, and most $M_s \geq 6.0$ earthquakes are distributed in the negative anomaly area or the boundary of the positive and negative abnormal areas in the study area.

Keywords: NGDC-720 model; lithospheric magnetic field; seismomagnetic characteristics; positive and negative anomalies area