

2006 ~ 2010 年云南东部地区磁偏角变化特征^{*}

倪 喆^{1,2}, 李春光², 陈 斌³, 袁浩浩³, 狄传芝³

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 云南省地震局, 昆明 650224;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 利用 2006 ~ 2010 年云南东部地区 9 期地磁三分量观测资料, 经过日变改正、长期变化改正消除地磁场的日变化及长期变化影响, 计算各期地磁内源场的曲面样条模型并剥离出地磁异常场分布, 求解相邻两期地磁异常场差异获取地磁异常场的变化, 并对磁异常场中磁偏角分布的变化进行了描述。

关键词: 曲面样条模型; 磁偏角异常; 云南东部地区

中图分类号: P318.4⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)01-0030-05

0 引言

地磁测量数据是研究地磁场及其长期变化在空间—时间上分布的基本数据。用地磁数据可以直接绘制地磁图, 计算地磁场模型, 并绘制相应的理论地磁图(高金田等, 2006)。地磁场模型分为全球模型和区域模型。国际地磁学与高空物理学协会(IA-GA)每 5 年给出一代全球地磁场模型——国际地磁参考场(IGRF), 2010 年 IAGA 给出了第 11 代 IGRF, 它是描述地球主磁场的标准模型。不同国家的学者使用各种数学方法来建立本国的区域地磁场模型, 我国学者曾经使用泰勒多项式方法(安振昌等, 1991; 林金狮等, 1994)、球谐分析方法(安振昌, 2000)、按距离加权最小二乘曲面拟合法(郭启华等, 1986)、矩谐分析方法(徐文耀, 朱岗昆, 1984; 朱岗昆, 徐文耀, 1985)和曲面样条方法(顾左文等, 2006)等数学方法来建立中国地磁场模型或局部地区地磁场模型。

地磁学中, 按场源位置划分, 地磁场可以分为内源场和外源场。内源场起源于地表以下的磁性物质和电流, 它可以进一步分为地核场和地壳场。地核场又称主磁场, 它是由地核磁流体发电机产生的。地壳场又称局部磁异常场, 它是由地壳磁性岩石产生的。外源场起源于地表以上的空间电流体系, 这些电流体系随时间变化较快, 所以外源场又叫变化磁场(徐文耀, 2003)。

从 2006 年至今, 由地震行业科研专项“地震

与构造活动重点监视区地磁基本动态场模型研究”和“青藏高原东缘地区地磁场变化加密观测研究”项目资助, 中国地震局地球物理研究所和云南省地震局形变测量中心在云南东部地区共同开展了 9 期地磁场三分量(F 、 D 、 I)观测。笔者将这九期地磁数据归算到“2010.0 年代”, 采用曲面样条方法, 分别建立各期云南东部地区地磁内源场的曲面样条模型。利用“2010.0 年代中国地磁图”和 IGRF11 中的数据建立球冠谐正常场模型。以球冠谐正常场作为该地区的主磁场, 通过从内源场中剥离主磁场获得磁异常场, 再通过求相邻期磁异常场的差值, 得到云南东部地区磁异常场分布的时序变化。限于篇幅原因, 本文仅对磁偏角(D)的异常分布变化特征进行描述。

1 数据采集与处理

1.1 数据采集

使用 G-856 质子旋进磁力仪测量 F 值, 精度为 0.1 nT; 使用 CDM-DI 磁通门磁力仪测量 D 和 I 值, 精度为 0.2'; 使用 Ashtech 单频差分 GPS 接收机测量地理经纬度、高程和地理方位角, 水平定位精度为 5 mm, 垂直定位精度为 10 mm, 地理方位角测量精度优于 6" (高金田等, 2005)。云南东部地区野外测量的 9 期地磁三分量数据分别为磁场总强度(F)、磁偏角(D)和磁倾角(I)的绝对观测值, 通过这三个分量可解算出其它 4 个地磁分量(H 、 X 、 Y 、 Z)。观测数据日变通化均方差

* 收稿日期: 2010-11-05.

基金项目: 地震与构造活动重点监视区地磁基本动态场模型研究(200708011)资助.

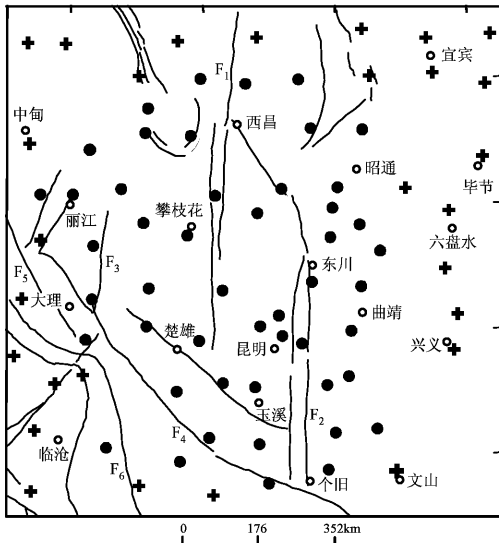
F 最大值为 1.3 nT , D 最大值为 $0.46'$, I 最大值为 $0.3'$, 均优于规范所规定的 $F < 1.5 \text{ nT}$, $D < 0.5'$, $I < 0.5'$ 。

1.2 数据日变改正和长期变改正

因地磁场随时间变化而变化, 这就需要将在不同时期测量所得的地磁数据归算到某一特定时刻, 经归算后的地磁数据才具有对比分析的价值。本文中9期测量数据均使用通海地磁基准台的分均值资料进行日变改正, 长期变改正则采用国内36个地磁台的日均值所建立的“1995.0~2010.0中国地区地磁基本场长期变化 NOC 模型”(顾左文等, 2009)。

1.3 数据取舍

为了改善云南东部地区地磁场模型的边界效应, 笔者在该区域周边缺少测点的地区采用了28个“2010.0年代中国地磁图”的测点(图1)。由于曲面样条模型有“过点”拟合的特性, 所以笔者利用最新一期的全部测点数据计算云南东部地区曲面样条模型并绘制等值线图后, 发现在测点间距小于 10 km 的区域内等值线会发生严重的扭曲现象, 所以将昆明和会泽两地间距小于 10 km 的6个测点删除。



F₁: 安宁河断裂; F₂: 小江断裂; F₃: 程海断裂; F₄: 红河断裂; F₅: 维西-乔后断裂; F₆: 无量山断裂

图1 云南东部地区地磁测点分布

(图中黑点表示重复测点, “+”表示“2010.0年代中国地磁图”的测点)

Fig. 1 Distribution of geomagnetic stations in east Yunnan area

(The point stands for the repeat station and the cross stands for the stations of the geomagnetic map in China 2010.0)

2 局部磁异常场计算

理论上, 利用仪器在地球表面所观测到的地磁场绝对值, 通过日变改正可将变化磁场消除, 再通过长期变改正就可将内源场的变化消除。利用数学模型对内源场中的地核场进行剥离便可获得局部磁异常场。本文对局部磁异常场的定义是曲面样条模型内源场值减去球冠谐模型正常场值, 就磁偏角 D 而言

$$D_{AN} = D_{SP} - D_{SCH\text{正常}} \quad (1)$$

式中, D_{AN} 代表磁偏角异常场值, D_{SP} 代表曲面样条模型中磁偏角内源场值, $D_{SCH\text{正常}}$ 代表球冠谐模型中磁偏角正常场值。

2.1 曲面样条模型求解方法

曲面样条方法用下式表示区域地磁内源场的分布:

$$W(x, y) = a_0 + a_1 + a_2 y + \sum_{i=1}^N F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \varepsilon). \quad (2)$$

式中, $W(x, y)$ 表示坐标 (x, y) 处地磁场的各独立要素, 其中

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2. \quad (3)$$

ε 为控制曲面曲率变化的小量, 根据模型计算的需要而设定。 a_0 , a_1 , a_2 , F_i 是待定系数, 可由下列方程组求出:

$$\begin{cases} W_j = a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + \sum_{i=1}^N F_i r_{ij}^2 \ln(r_{ij}^2 + \varepsilon), \\ j = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N x_i F_i = \sum_{i=1}^N y_i F_i = 0. \end{cases} \quad (4)$$

曲面样条模型共有 $(N+3)$ 个系数, N 为参与模型计算的数据点个数。

用该模型计算的云南东部地区的空间区域为: $22.8^\circ \sim 29.3^\circ \text{N}$, $99.5^\circ \sim 105.5^\circ \text{E}$ 。表1为云南东部地区每期测点和新增加的28个“2010.0年代中国地磁图”测点所构成的各期数据集。利用每期数据集分别计算曲面样条模型, 模型控制曲面曲率 $\varepsilon = 10^{-7}$ 。

表 1 各期观测时间及计算模型点数

Tab. 1 Each observational time and calculation model sites

测量时间	测点个数	计算模型点数
2006 - 04	44	72
2006 - 09	43	71
2007 - 04	49	77
2007 - 10	55	77
2008 - 05	55	77
2008 - 11	55	77
2009 - 03	55	77
2009 - 11	55	77
2010 - 04	55	77

2.2 球冠谐模型求解方法

2.2.1 计算球冠谐模型异常场

在球冠坐标系下地磁异常场 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 可以表示为式 (5)。式中 φ 和 θ 分别是球冠谐坐标系中的经度和余纬; a 是地球参考半径 ($a = 6\,371.2\text{ km}$); r 是离开地心的径向距离; $P_{n_k(m)}^m(\cos\theta)$ 是非整数阶 $n_k(m)$ 和整数次 m 的 Schmidt 缔合 Legendre 函数; K_{\max} 代表球冠谐分析中的最大截断阶数。

$$\begin{cases} \Delta X = \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n_k(m)+2} (g_k^m \cos m\varphi + h_k^m \sin m\varphi) \frac{dP_{n_k(m)}^m(\cos\theta)}{d\theta}, \\ \Delta Y = \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=1}^k \frac{m}{\sin\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^{n_k(m)+2} (g_k^m \sin m\varphi - h_k^m \cos m\varphi) P_{n_k(m)}^m(\cos\theta), \\ \Delta Z = - \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^k (n_k(m) + 1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n_k(m)+2} (g_k^m \cos m\varphi + h_k^m \sin m\varphi) P_{n_k(m)}^m(\cos\theta). \end{cases} \quad (5)$$

用该模型计算的中国地区的空间区域为: $18^{\circ} \sim 54^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ} \sim 136^{\circ}\text{E}$ 。球冠极位置坐标为 $(27^{\circ}\text{N}$, $104.5^{\circ}\text{E})$ 。选取的球冠半角为 35° , 全部测点位于球冠内。最大截断阶数取 8 阶。

2.2.2 计算球冠谐模型正常场

利用国际参考地磁场第十一代 IGRF 和“2010.0 年代中国地磁图”数据建立的中国地区地磁异常场球冠谐模型, 可计算出中国地区地磁正常场球冠谐模型。就磁偏角 D 而言,

$$D_{\text{SCH正常}} = D_{\text{IGRF11}} + D_{\text{SCH异常}} \quad (6)$$

式中 $D_{\text{SCH正常}}$ 代表球冠谐模型中磁偏角正常场值, D_{IGRF11} 代表 IAGA 给出的第 11 代 IGRF 磁偏角计算值, $D_{\text{SCH异常}}$ 代表球冠谐模型中磁偏角异常场值。

2.3 云南东部地区磁异常场的获取

笔者通过该地区 9 期通化数据分别建立“2010.0 年代曲面样条内源场”模型, 利用 Matlab 程序从中国地区球冠谐正常场模型中裁取云南东部地区, 得到云南东部地区球冠谐正常场模型。云南东部地区磁异常场可由上述两个模型之差计算获得, 即 9 期的曲面样条内源场模型减去球冠谐正常场模型所得的差值。

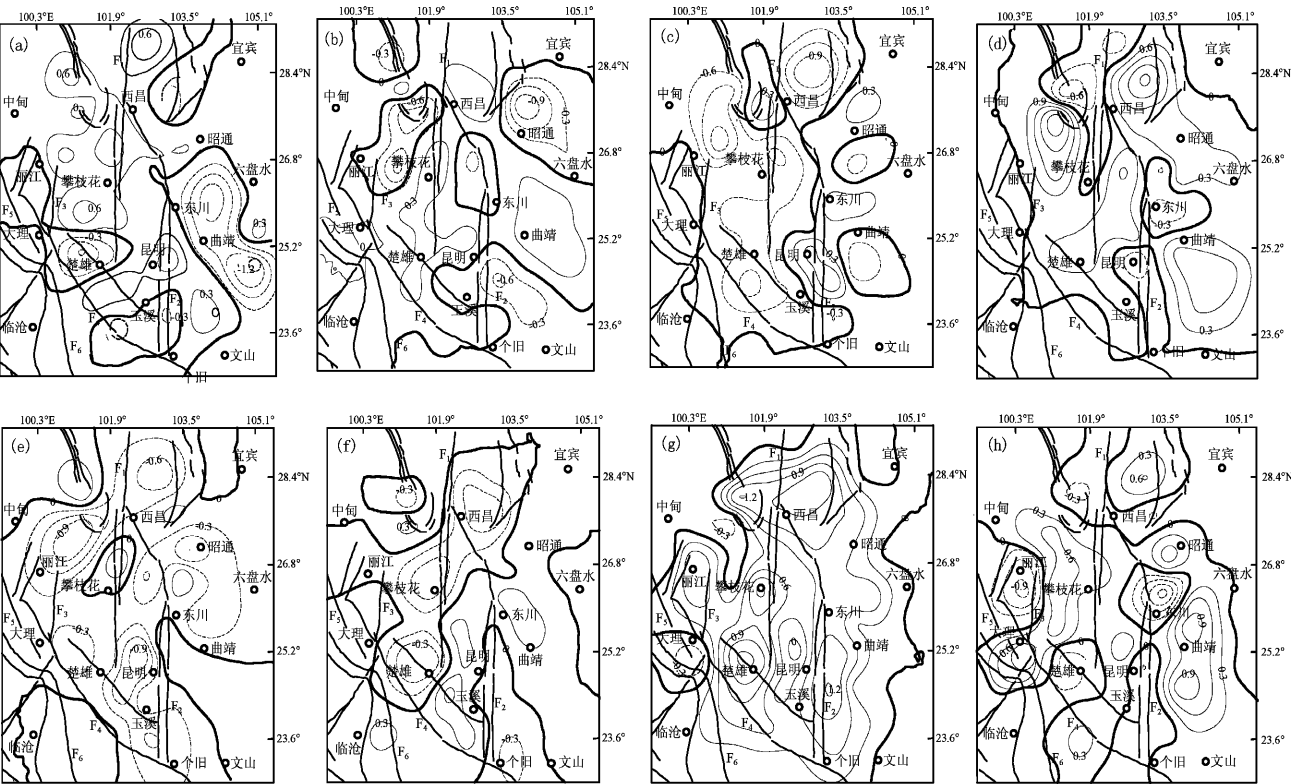
3 云南东部地区磁偏角 D 异常的时序分布

根据上述过程可获得云南东部地区 9 期磁异常

场模型, 进一步求出相邻两期磁异常场模型差值 (后一期减去前一期), 就得到磁异常场各分量的变化量并绘制相应的等值线图 (图 2)。

磁偏角是磁北与地理北之间的夹角。如果磁偏角为负值, 表示磁北在地理北的西边。云南东部地区的磁偏角均为负值, 如果后一期模型的磁偏角值减去前一期的值为正值, 则表示磁偏角的值在增大, 如果为负值则表示磁偏角减小; 如果为零则表示磁偏角值未发生变化。图 2 中, 实线所形成的闭合圈为磁偏角正异常中心, 虚线所形成的闭合圈是负异常中心。因此, 云南东部地区磁异常场中磁偏角随时间变化有如下描述:

(1) 正异常中心的空间分布。2006 年 4 月至 2008 年 11 月内的 5 个时间段中, 最大正异常中心主要分布在安宁河断裂中段西侧和小江断裂中段东侧。最大正异常中心与安宁河断裂的最短距离约为 5 km , 最远距离约为 160 km , 正异常中心最大变化量为 $1.3'$, 最小变化量为 $0.3'$ 。最大正异常中心与小江断裂最短距离约为 5 km , 最远距离约为 130 km , 正异常中心最大变化量为 $0.8'$, 最小变化量为 $0.5'$ 。2008 年 11 月至 2010 年 4 月的 3 个时间段里, 安宁河断裂中段的最大正异常中心从西侧迁移到了东侧, 迁移总距离约为 160 km ; 小江断裂中段的最大正异常中心从东侧迁移到了西侧, 迁移总距离约为 300 km 。值得关注的是, 2009 年 11 月至 2010 年 4 月迁移到小江断裂中段西



F₁: 安宁河断裂; F₂: 小江断裂; F₃: 程海断裂; F₄: 红河断裂; F₅: 维西—乔后断裂; F₆: 无量山断裂

图 2 2006 ~ 2010 年云南东部地区磁偏角 (D) 异常分布时序变化图
(图中等值线间隔为 $0.3'$; 粗实线为 0, 细实线为正, 虚线为负)

(a) 2006 年 4 ~ 9 月; (b) 2006 年 9 月至 2007 年 4 月; (c) 2007 年 4 ~ 10 月; (d) 2007 年 10 月至 2008 年 5 月;
(e) 2008 年 5 ~ 11 月; (f) 2008 年 11 月至 2009 年 3 月; (g) 2009 年 3 ~ 11 月; (h) 2009 年 11 月至 2010 年 4 月
Fig. 2 Anomalous distribution of changes of geomagnetic declination in east Yunnan area from 2006 to 2010
(Contour interval is $0.3'$; Thick solid lines represents zero, solid lines represent positive, and dashed lines represent negative)
(a) Apr. - Sep. , 2006; (b) Sep. , 2006 - Apr. , 2007; (c) Apr. - Oct. , 2007; (d) Oct. , 2007. - May, 2008;
(e) May - Nov. , 2008; (f) Nov. , 2008 - Mar. , 2009; (g) Mar. - Nov. , 2009; (h) Nov. , 2009 - Apr. , 2010

侧的最大正异常中心所处的地理位置在程海断裂、红河断裂、维西—乔后断裂、无量山断裂、澜沧江断裂和南汀河断裂的交汇处, 其变化量为 $1.2'$ 。

(2) 正、负异常的相互演变。演变以 2008 年 5 月至 2010 年 4 月内的 4 个时间段尤为明显。2008 年 5 ~ 11 月该地区以负异常为主; 2008 年 11 月至 2009 年 3 月该地区负异常范围缩小, 正异常范围扩大; 2009 年 3 ~ 11 月该地区以正异常为主; 2009 年 11 月至 2010 年 4 月该地区正、负异常所占区域相对均衡。

(3) 最大正、负异常值的变化量。为更好地说明最大正、负异常变化的形态, 笔者从图上量取最大正、负异常变化量, 绘制随时间的变化图 (图 3)。从图 3 可以看出: 最大正异常值在 $0.5' \sim 1.5'$ 之间变化, 最大负异常值在 $-0.4' \sim -1.2'$ 之

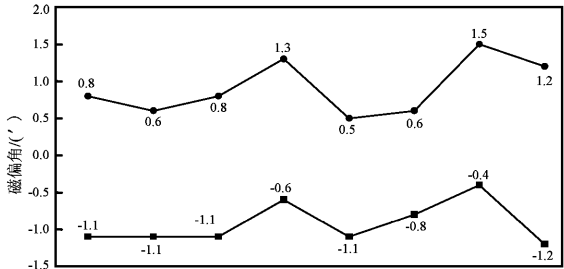


图 3 磁偏角最大正、负异常值时序变化
(图中数字表示相邻期差值)

Fig. 3 Changes of the maximum positive and negative values for geomagnetic declination
(the numbers in the figure stand for the difference between adjacent times)

间变化。最大正、负异常的变化量在各个时间段内均不相同, 如 2007 年 10 月至 2008 年 11 月之间

的两个时间段,最大正异常值从 $1.3'$ 减小到 $0.5'$,变化了 $0.8'$;最大负异常值从 $-0.6'$ 减小到 $-1.1'$,变化了 $0.5'$ 。

4 结论与讨论

由 2006~2010 年云南东部地区磁异常场中磁偏角的变化可以看出:① 安宁河断裂中段最大正异常中心由西向东迁移;小江断裂中段最大正异常中心由东向西迁移,最终止于多条断裂的交汇处。② 正、负异常区域的演变遵循正、负异常区域相对均衡→正异常区域缩小→负异常区域扩大→正异常区域扩大→负异常区域缩小→正、负区域相对均衡的规律。

本文中,我们从地磁内源场中剥离地核场从而得到局部磁异常场。一般来说,局部磁异常场是极其稳定的,它产生的根源是地壳内磁性岩石的不均匀分布。但一些构造运动可以引起磁异常场的变化(徐文耀,2003)。我们根据上述分析推断,云南东部地区存在某种较为剧烈的构造运动,这些构造运动造成该地区应力场发生变化,进而引起地壳中岩石磁性发生改变,最终导致磁异常场的变化。

显然,对 9 期地磁三分量观测资料的研究能在一定程度上反映近期云南东部地区磁异常场的变化,但是要研究该地区磁异常场变化与其构造运

动的相关性,则需要积累更长时间的地磁观测资料。

中国地震局地球物理研究所顾左文研究员和云南省地震局形变测量中心邵德盛研究员对笔者的悉心指导,感谢通海地磁台孙维怀副台长、张福工程师在台站资料搜集上给予的帮助。

参考文献:

- 安振昌. 2000. 青藏高原地磁场模型的研究[J]. 地球物理学报, 43(3): 339-345.
- 安振昌, 徐元芳, 王月华. 1991. 1950~1980 中国地区主磁场模型的建立及分析[J]. 地球物理学报, 34(5): 585-593.
- 高金田, 安振昌, 顾左文, 等. 2005. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算[J]. 地球物理学报, 48(1): 56-62.
- 高金田, 安振昌, 顾左文, 等. 2006. 用曲面 Spline 方法表示 1900~1936 年中国(部分地区)地磁场及其长期变化的分布[J]. 地球物理学报, 49(2): 97-10.
- 顾左文, 张毅, 姚同起, 等. 2006. 九江—瑞昌 M5.7 地震地磁异常的观测与分析[J]. 地震学报, 28(6): 611-621.
- 顾左文, 陈斌, 高金田, 等. 2009. 应用 NOC 方法研究中国地区地磁时空变化[J]. 地球物理学报, 52(10): 2602-2612.
- 郭启华, 林云芳, 曾小平, 等. 1986. 关于区域性地磁长期变化的探讨(英文)[J]. 地震研究, 9(1): 101-112.
- 林金狮, 王梅, 苏孟如. 1994. 泰勒多项式拟合法在地磁测量资料分析中的应用[J]. 地震研究, (4): 355-361.
- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社.
- 徐文耀, 朱岗崑. 1984. 我国及临近地区地磁场的矩谱分析[J]. 地球物理学报, 27(6): 511-522.
- 朱岗崑, 徐文耀. 1985. 我国及邻近地区的嵌套式磁场模型[J]. 地球物理学报, 28(2): 133-141.

Variation of Geomagnetic Declination in East Yunnan from 2006 to 2010

NI Zhe^{1,2}, LI Chun-guang², CHEN Bin³, YUAN Jie-hao³, DI Chuan-zhi³

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(3. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract

Using nine-term of three-component geomagnetic data observed in the eastern area of Yunnan Province from 2006 to 2010, we eliminate the effects of the diurnal variation and the secular variation of the geomagnetic field through correction, calculate each term's surface spline model of the interior geomagnetic field, separate the distribution of the geomagnetic anomalous field, and get the differences between two successive terms of the geomagnetic anomalous field and acquire the variation of the geomagnetic anomalous field. Finally, we describe the variation of the distribution of the geomagnetic declination in the geomagnetic anomalous field.

Key words: surface spline model; anomaly of geomagnetic declination; east Yunnan