

安振昌,彭丰林,刘少华等. 2014. 1683—1949 年中国地磁测量、地磁图和地磁模型的总考评与研究. 地球物理学报, 57(11): 3795-3803, doi:10. 6038/cjg20141133.

An Z C, Peng F L, Liu S H, et al. 2014. Inspection and study on the geomagnetic survey, charts and models during 1683—1949 in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11): 3795-3803, doi:10. 6038/cjg20141133.

1683—1949 年中国地磁测量、地磁图和地磁模型的总考评与研究

安振昌^{1,3}, 彭丰林^{1,2,3*}, 刘少华³, 王广福³

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029

3 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要 本文全面系统回顾考察了新中国成立前中国的地磁测量、地磁图和地磁模型研究概况; 主要介绍中国人独立进行的地磁测量; 评述了 1932 年山东半岛地磁图, 1915.0 和 1936.0 年中国(部分地区)地磁图; 1945.0 年东亚地磁图; 1946.1 年四川北碚地区地磁图以及 1946.1 年四川北碚地区地磁场泰勒多项式模型, 并根据 1936 年地磁数据计算研究了 1936.0 年中国地磁场的球冠谐波模型和曲面 Spline 模型, 以及 1900.0—1940.0 年 5 个年代的中国地磁数据集、地磁模型和地磁图. 对今后我国地磁测量研究工作给出了几点建议.

关键词 地磁测量; 地磁图; 地磁模型; 中国

doi:10. 6038/cjg20141133

中图分类号 P318

收稿日期 2014-07-16, 2014-10-17 收修定稿

Inspection and study on the geomagnetic survey, charts and models during 1683—1949 in China

AN Zhen-Chang^{1,3}, PENG Feng-Lin^{1,2,3*}, LIU Shao-Hua³, WANG Guang-Fu³

1 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract We have comprehensively investigated and reviewed the geomagnetic survey, Geomagnetic Charts and the study of the geomagnetic field model during 1683—1949 in China. We mainly focused on the independent geomagnetic survey by Chinese scientists. The 1932 Geomagnetic Chart of Shandong Peninsula, 1915.0 Geomagnetic Chart and 1936.0 Geomagnetic Chart of Part of China, 1945.0 Geomagnetic Chart of East-Asia, 1946.1 Geomagnetic Chart of Pehpei, Sichuan Province, the Taylor polynomial model of 1946.1 geomagnetic field of Pehpei, Sichuan Province have been reviewed. Based on the geomagnetic survey data during 1936, we have derived the spherical cap harmonic model and surface Spline model of the geomagnetic field of China. The geomagnetic data sets, geomagnetic models, and Geomagnetic Charts of China for 5 decades from 1900.0 to 1940.0 have also been integrated and analyzed. Several suggestions

基金项目 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-02-02)、国家自然科学基金项目(40544017)和中国科学院信息化专项(XXH12504-1-08)资助.

作者简介 安振昌,男,研究员,主要从事地磁学观测与研究. E-mail:anzhenchang@sina.com

* **通讯作者** 彭丰林,男,中国科学院地球物理学博士,主要从事地磁与空间物理学、地球物理信息学研究. E-mail:pengf@geophys.cn

about the future geomagnetic survey and related research works in China have been given in this paper.

Keywords Geomagnetic survey; Geomagnetic Chart; Geomagnetic model; China

1 引言

新中国成立后,从 1950 年开始在全国范围内,有计划、系统地进行了全国地磁测量、编制地磁图和建立地磁模型等工作.在此前,自 1683 年开始,在中国就开始零散进行过地磁测量.而中国近代地磁测量则始于 19 世纪下半叶,地磁图编制工作则要晚到 20 世纪 30 年代,建立地磁模型的工作则更迟到 20 世纪 40 年代.我国学者对解放以后中国的地磁测量研究进行过深入系统的总结(朱岗崑,1979;徐文耀,1994,1997;安振昌,1999,2002),对相应的地磁图编制和地磁模型研究也获得了很多研究进展(安振昌,1995;徐文耀等,2011),但对解放以前中国的地磁测量研究几乎无人问津.

2010 年,中国地球物理学会承担了中国科学技术协会“中国地球物理学学科史研究”项目,2012 年完成.继而又获得中国科学院的支持,对“中国地球物理学学科史”进行补充、修改和完善工作.其间,课题组和地磁学家合作,对 1949 年以前中国地磁学史进行了深入研究:在广泛收集历史资料基础上,对资料进行了整理、研判;对研究文献进行了梳理;对解放以前的中国地磁测量、地磁图和地磁模型进行了全面系统的评述.

陈宗器先生对 1943 年以前的中国地磁测量进行了经典的权威的总结(陈宗器,1944;桂质廷,1986),本文将这种总结延伸至 1949 年.文章首次全面考察评述了解放以前中国的地磁图和地磁模型,并计算研究了 1936.0 年地磁场的球冠谐模型和曲面样条模型.文章还介绍了 1900.0—1940.0 年 5 个年代的中国地磁数据集、地磁模型和地磁图,为研究我国 20 世纪上半叶地磁场时空变化创造了条件.文章最后对我国今后的地磁测量研究工作给出了几点建议.

回顾中国地磁学的发展历程,陈宗器等老一辈地磁学家的学术思想对于当今中国地磁学发展仍有重要指导意义.

2 地磁测量

2.1 初期地磁测量

中国境内现代科学意义上最早的地磁测量是

1683 年(清康熙二十二年)在北京测量地磁偏角.初期地磁测量,测量要素不完全.最初只测量磁偏角,后来除测量磁偏角外还测量磁倾角.这些地磁测量均为外国人所做的零星工作(陈宗器,1944).1683—1782 年近一百年间,只是在北京、南京、广州等十余点测量单一地磁要素磁偏角;1780—1892 年一百多年间,在香港和上海徐家汇两地进行磁偏角和磁倾角两个地磁要素的重复地磁测量,其中在香港测量磁偏角 12 次,测量磁倾角 18 次;在上海徐家汇先后 4 次测量磁偏角和磁倾角.

2.2 近代地磁测量

近代地磁测量是指地磁三个独立要素的绝对测量,例如测量磁偏角(D)、磁倾角(I)和水平强度(H),或测量磁偏角、磁倾角和总强度(F).

2.2.1 外国人进行的地磁测量

中国境内最早的地磁三分量绝对测量是 1867 年俄国人 H. Fritsche 在库伦测量磁偏角、磁倾角和水平强度.

19 世纪下半叶至 20 世纪初,俄国、法国、日本、美国和德国先后在我国进行地磁三分量绝对测量.按年代先后,简单列举如下(陈宗器,1944;Burgaud 和鲁如曾,1937):

1867—1913 年,俄国人在我国共测 263 点.

1897—1937 年上海徐家汇地磁台法国人和中国人在长江流域、东南沿海及两广云南等地共测 123 点,其中包括 17 个地磁复测点(Observatoire de Zi-Ka-Wei,1909).

1903 年日本人在香港、徐家汇等地测量 4 点.

1906—1935 年美国华盛顿卡耐基研究所在中国境内共测 553 点(复测点累积计算).开始阶段完全由美国人进行测量,20 世纪 30 年代以后出现了中国人的身影(Carnegie Institution of Washington, 1911,1914,1921,1927;Brown and Kwei,1933).

1926—1928 年和 1936—1938 年德国人 W. Filchner 曾先后两次在新疆、甘肃、西藏、青海等地共测 510 点.

2.2.2 中国人进行的地磁测量

20 世纪 20 年代初开始,越来越多的中国人进行地磁三分量绝对测量.按时间先后,分述如下(陈宗器,1944;Burgaud 和鲁如曾,1937):

1922 年 5 月—1923 年 2 月,鲁如曾测量厦门、

福州、杭州、南京、济南、天津等 16 点。这是首次由中国人完成的地磁三分量绝对测量(Observatoire de Zi-Ka-Wei, 1923)。

1932 年 5—7 月教育部中央气象台青岛观象台吕蓬仙、徐汇阔在山东半岛高密、淮县、蓬莱等 11 点进行地磁野外三分量绝对测量(吕蓬仙, 1933)。

1932 年 7—9 月, 美国人 F. C. Brown 和桂质廷复测西安、郑州、太原、北平等 8 点, 并新测狭州及定县两点(Brown and Kwei, 1933)。

1933 年 7 月桂质廷测量宜昌、重庆、万县等 5 点。

1934 年 12 月至 1935 年 1 月法国人比尔格(S. J. Burgaud)与龚惠人测量北海、昆明、龙州等 6 点。

1935 年 7—8 月桂质廷复测广州、南宁、桂林等 6 点。

1936 年 3—6 月, 中央研究院物理研究所陈宗器负责, 鲁如曾协助, 共测广州、汕头、厦门、福州、温州、普陀等 14 点。

1939 年 4—6 月, 陈志强、林树棠等测量广西宜山、河池、柳州等 8 点。

1940 年 12 月陈宗器、陈志强等测量广西桂林良丰雁山 1 点。

1940—1943 年经济部中央地质调查所刘庆龄、李善邦在我国西南地区四川、云南、贵州、湖南共完成 66 个测点的地磁三分量绝对测量(Liu and Lee, 1948)。

1941 年 12 月至 1942 年 7 月, 中央研究院物理研究所与福建气象局合作测量福建省地磁场, 陈志强与舒盘铭、陈宗器与吴乾章、吴乾章与舒盘铭先后共测 13 点。

1945 年 12 月至 1946 年 5 月陈宗器在重庆北碚地区进行了详细的地磁三分量绝对测量, 共完成 15 个测点(Chen, 1948)。

1946—1947 年陈宗器主持下, 刘庆龄、胡岳仁和周绳祖在中国各地共测 47 个三分量地磁测点(包括 32 个复测点), 其中刘庆龄和胡岳仁在四川测量 16 点, 在长江流域测量 21 点; 刘庆龄和周绳祖在东南沿海和南海海域共测 10 点。其中 1947 年 4 月 25—28 日在西沙永兴岛的测量以及 1947 年 5 月 22—23 日在南沙太平岛的测量, 这是中国学者首次完成我国南海诸岛地磁三分量绝对测量(Chen and Liu, 1948)。

综上所述, 1922—1949 年中国学者共完成 218 个测点的地磁三分量绝对测量, 其中刘庆龄先后完成 113 个测点的地磁测量, 包括永兴岛和太平岛的

测量。这些地磁数据为编绘我国首幅 1950.0 年中国地磁图奠定了坚实基础。该地磁图于 1955 年在上海正式出版并通过审查审评, 中国科学院副院长竺可桢指出: “《1950.0 中国地磁图》代表了中国科学水平, 你们完成了一件有意义的工作, 更希望你们做出更多首创的成绩。”

3 地磁图

3.1 1932 年山东半岛地磁图

青岛观象台吕蓬仙、徐汇阔 2 人根据 1932 年在山东半岛获得的 11 个野外地磁测点和青岛地磁台共 12 个地点的三分量地磁数据, 于 1933 年编绘出版 1932 年山东半岛地磁图, 包括磁偏角、水平强度和磁倾角共 3 幅彩色地磁图(吕蓬仙, 1933)。根据地磁图出版时间的先后, 1932 年山东半岛地磁图是中国学者绘制的中国第一幅区域地磁图。

3.2 1915.0 年和 1936.0 年中国(部分地区)地磁图

上海徐家汇地磁台 Burgaud 和鲁如曾(1937)共同编绘 1915.0 年和 1936.0 年中国地磁图。虽然称作“中国地磁图”, 但图幅范围仅为 18°N — 44°N , 98°E — 125°E 。远没有涵盖整个中国地区, 故我们称作“中国(部分地区)地磁图”。该地磁图是根据 1906—1936 年期间的 415 个地磁测点数据编绘的, 其中 1906—1917 年主要是美国华盛顿卡耐基研究所在中国进行地磁测量, 1922—1936 年除卡耐基研究所的地磁测量外, 还有中国人进行的地磁测量。

1915.0 年地磁图只有磁偏角地磁图, 1936.0 年地磁图包括三个地磁要素的地磁图: 磁偏角、水平强度和垂直强度。该地磁图不仅有等值线图, 而且还有等变线图, 分别为: 1915.0 年和 1936.0 年两幅磁偏角等值线图, 1909—1915, 1915—1920, 1920—1930, 1930—1936 四幅磁偏角等变线图(或称长期变化图); 1936.0 年水平强度等值线图, 以及 1908—1917, 1917—1922, 1922—1936 三幅水平强度等变线图(或称长期变化图); 1936.0 年垂直强度等值线图, 以及 1908—1922, 1922—1936 年两幅垂直强度等变线图(或称长期变化图)。

3.3 1945.0 年东亚地磁图

朱岗崑(1950)在《中国科学》上发表了“1945.0 年东亚地磁图”, 包括磁偏角图、水平强度图、垂直强度图和磁倾角图共四幅地磁图。每幅地磁图上只有等值线, 而无等变线。

朱岗崑根据 Vestine 等(1947)书中表 47、48、49

和 52 给出的 1945.0 年地磁场网格点($5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 或 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$)数据以及刘庆龄和李善邦于 1940—1943 年在中国西南地区的地磁测量数据(Liu and Lee, 1948)和陈宗器、刘庆龄于 1946—1947 年所获得的地磁数据(Chen and Liu, 1948), 编绘了 1945.0 年东亚地磁图。

1945.0 年东亚地磁图的范围为 $10^{\circ}\text{N}—60^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}—150^{\circ}\text{E}$, 包括了我国绝大部分地区, 但没有包括新疆、西藏的西部地区, 故严格地讲朱岗崑编绘的 1945.0 年东亚地磁图并非是第一套涵盖中国全境的地磁图。

3.4 1946.1 年四川北碚地区地磁图

陈宗器等于 1945 年 12 月 25 日至 1946 年 5 月 5 日在四川北碚地区进行了详细的地磁测量, 使用 Askania 便携式地磁经纬仪测量磁偏角、磁倾角和水平强度; 在进行野外测量的时候, 还用 Smith 磁力仪和 Askania 小型地磁感应仪在测区基点上进行了磁偏角、水平强度和磁倾角的日变观测。

野外测量共 15 个测点, 测量开始和结束以及测量中间, 野外测量仪器均在基点(日变站)进行仪器比测, 最后还与上海佘山地磁台的仪器进行了比测, 以达到国际地磁标准(IMS)。每个测点的测量值均进行日变改正, 然后归算至 1946 年 2 月 5 日, 即 1946.1 年。陈宗器根据这些地磁数据, 编绘 1946.1 年四川北碚地区地磁图, 包括磁偏角、磁倾角和水平强度三幅地磁图, 并分析了地磁场的空间变化特征(Chen, 1948; Chapman and Bartels, 1940)。

陈宗器在地磁测量过程中设立地磁日变站和进行地磁仪器比测的作法, 对保证地磁数据的精度十分必要, 对当今我国地磁测量仍具有重要的指导意义。

4 地磁模型

4.1 1946.1 年四川北碚地区地磁场泰勒多项式模型

1948 年陈宗器指出四川北碚地区地磁测量数据可以用测点经纬度的二阶泰勒多项式表示(Chen, 1948)。例如地磁偏角 D 的表达式为:

$$D = -82.34' - 0.18'\Delta\varphi + 1.16'\Delta\lambda - 0.12'\Delta\varphi^2 - 0.54'\Delta\varphi\Delta\lambda + 0.38'\Delta\lambda^2 \pm 2.52',$$

式中 φ 为地理纬度, λ 为地理经度, $\Delta\varphi = \varphi - 29^{\circ}50.0'$, $\Delta\lambda = \lambda - 106^{\circ}25.0'$ 。

陈宗器计算的 1946.1 年四川北碚地区地磁场

泰勒多项式模型, 这是中国学者首次计算的地磁模型, 陈宗器也是世界首位计算中国国内地磁场模型的学者。

4.2 1936.0 年中国地区地磁场的球冠谐模型

安振昌(2003a)计算了 1936.0 年中国地区地磁场的球冠谐模型。1936.0 年 426 个三分量地磁测点分布在 $18^{\circ}\text{N}—44^{\circ}\text{N}$ 和 $98^{\circ}\text{E}—124.5^{\circ}\text{E}$ 范围内, 覆盖中国大部分地区, 但并非整个中国。为了计算中国及邻近地区的地磁模型, 在周围地区均匀布设 66 个国际地磁参考场(IGRF)计算点。根据上述地磁数据, 计算了 1936.0 年中国地区地磁场 8 阶球冠谐模型, 绘制各个地磁要素的等值线分布图, 并研究地磁场的空间分布特征。

4.3 1936.0 年中国(部分地区)地磁场曲面 Spline 模型

高金田等(2006)根据 1936.0 年 426 个测点以及 28 个 IGRF 计算点, 共计 454 个点的地磁数据, 计算地磁场各个分量的曲面 Spline 模型(研究区域为 $18^{\circ}\text{N}—44^{\circ}\text{N}$, $98^{\circ}\text{E}—125^{\circ}\text{E}$), 并编绘 1936.0 年中国(部分地区)地磁图。

5 1900.0—1940.0 年中国地区地磁数据集, 地磁模型和地磁图

5.1 1900.0—1940.0 年中国地磁数据集

为了获取整个中国地区的地磁数据, 安振昌、顾左文、高金田等把中国地磁图分成三个区域:

(1) 实测区: 1936.0 年 426 个地磁测点所在的区域($18^{\circ}\text{N}—44^{\circ}\text{N}$, $98^{\circ}\text{E}—125^{\circ}\text{E}$)。

(2) 归算区: 44°N 以北, 98°E 以西的中国境内区域。

(3) IGRF 计算区: 中国境外的周边地区。

5.1.1 1900.0—1940.0 年实测区地磁数据集

为了把实测区 426 个地磁测点 1936.0 年的磁偏角、水平强度和垂直强度数据归算至 1900.0, 1910.0, 1920.0, 1930.0 和 1940.0 的地磁数据, 我们选用曲面 Spline 方法, 分别建立了 1909—1936 年 4 幅磁偏角等变线图; 1908—1936 年 3 幅水平强度等变线图以及 1908—1936 年 2 幅垂直强度等变线图, 共计 9 幅等变线图(或长期变化图)的曲面 Spline 模型(高金田等, 2006), 并假设在各个时间段以及外延过程中, 各地磁要素的长期变化为线性变化, 于是将 1936.0 年的 426 个地磁测点的三分量地磁数据归算至 1900.0, 1910.0, 1920.0, 1930.0 和 1940.0 共 5 个年代, 为建立 1900.0—1940.0 年中

国地磁数据集和中国地磁场模型奠定基础。

5.1.2 1900.0—1940.0 年归算区地磁数据集

假设在几十年时间尺度内地磁场异常值不随时间变化。将我国测点最多的 1970 年(1882 个地磁测点)的中国地磁异常场球冠谐模型所表示的 74 个均匀分布的磁异常计算值(安振昌,2003b),与相应年代的地磁场全球模型 IGRF 的计算值(主磁场值)相加,就可获得对应年代的地磁场三分量绝对值,例如: ΔD_{1970} 表示 1970 年磁异常场, $D_{IGRF1900}$ 表示 IGRF1900 计算值,二者相加, $D_{IGRF1900} + \Delta D_{1970}$ 就表示 1900.0 年地磁场绝对值。用同样的方法可以获得 1910.0,1920.0,1930.0,1940.0 年的地磁数据集。

5.1.3 1900.0—1940.0 年 IGRF 计算区地磁数据集

在中国周边地区均匀选取 38 个 IGRF 计算点,根据相应年代的 IGRF 模型(Finlay et al.,2010),很容易计算对应年代的地磁场值(三分量绝对值),得到 IGRF 计算区的 1900.0,1910.0,1920.0,1930.0 和 1940.0 年 5 个年代的地磁数据集。

将上述实测区、归算区和 IGRF 计算区的地磁数据相加,就得到 1900.0—1940.0 年 5 个年代的中国地磁数据集。为研究我国 20 世纪上半叶地磁场时空变化创造了条件。

5.2 1900.0—1940.0 年中国地磁模型

根据 1900.0—1940.0 年中国地磁数据集,我们使用以下三种数学方法,建立三种类型的中国地磁模型。

(1) 泰勒多项式模型

地磁场分布可以用地理纬度和经度的泰勒多项式表示(Chen and Liu,1948):

$$F = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{nm} (\varphi - \varphi_0)^{n-m} (\lambda - \lambda_0)^m,$$

式中 F 为地磁场的的一个分量, X, Y 或 Z ; A 为多项式系数,根据测点的实测值用最小二乘法确定。 $\varphi_0 = 45^\circ, \lambda_0 = 105^\circ$ 。

(2) 球冠谐模型

在球冠坐标系里,磁异常可以表示为(Hains,1985):

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

式中 X 为地磁场东西方向强度, Y 为地磁场南北方向强度, Z 为地磁场垂直强度; $P_{n_k(m)}^m(\cos\theta)$ 为非整数阶 $n_k(m)$ 和整数次 m 的 Schmidt 缔合 Legendre 函数; a 为地球参考半径,取 6371.2 km; r 为离开地心的距离; g_k^m, h_k^m 为冠谐系数,根据地磁场的观测值用最小二乘法确定; θ 为余纬, $\theta = 90^\circ - \varphi$ 。

(3) 曲面 Spline 模型

地磁场的分布可以表示为(安振昌等,1982):

$$\begin{cases} W(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + \sum_{i=1}^N F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \epsilon), \\ \sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N x_i F_i = \sum_{i=1}^N y_i F_i = 0. \end{cases}$$

$W(x, y)$ 为坐标为 (x, y) 处的地磁场; $r^2 = x^2 + y^2$; ϵ 为控制曲面曲率变化的小量; a_0, a_1, a_2 和 F_i 为待定系数。

1900.0—1940.0 年 5 个年代中国地磁模型的建立,填补了 20 世纪上半叶中国地磁模型的空白,使我国具有 1900.0—2010.0 年一百多年完整的中国地磁模型系列,提高了我国地磁学的整体研究水平。

5.3 1900.0—1940.0 年中国地磁图集

根据上述三种不同类型的中国地磁模型,绘制三种数学模型地磁图(或称理论地磁图),分别是:1900.0,1910.0,1920.0,1930.0,1940.0 年 5 个年代的:

- (1) 泰勒多项式模型中国地磁图;
- (2) 球冠谐模型中国地磁图;
- (3) 曲面 Spline 模型中国地磁图。

1900.0—1940.0 年 5 个年代的中国地磁图填补了 20 世纪上半叶中国地磁图的空缺,使我国具有 1900.0—2010.0 年完整的中国地磁图系列,提升了中国地磁图在各个领域的科学研究和应用价值。

6 对今后我国地磁测量研究工作的几点建议

6.1 关于地磁测量

陈宗器(1944)关于地磁测量提出了4点建议:(1)测点须增加,(2)分布须均匀,(3)复测点须加多,(4)复测年限须缩短.这些建议对我国当代地磁测量仍具有指导意义,对我国地磁学科的发展具有深远影响.根据陈宗器的统计和我们的补充,1867—1949年中国境内共有958个三分量地磁测点.据我们的统计1950—2010年中国境内共完成三分量地磁测点4948个(复测点累积计算).陈宗器曾建议“全国当有三千余点”.经过60余年的努力,我国地磁测点总数已远远超过三千余点,然而陈宗器指出的“分布须均匀”、“从未测量之地带亟应增加新点”的建议仍具有现实指导意义.陈宗器提出的“复测点须加多”以及“中国的地磁复测点约三百余点”和“每隔五六年(最长十年)必须复测一次”的建议,更应引起我国地磁学界的高度重视.

1950—2010年间,中国科学院地球物理研究所、中国地震局地球物理研究所先后组织8次全国范围地磁测量和1次青藏高原地磁测量(安振昌等,1985;安振昌,1999).中国地磁测量有了迅速的发展,测量范围从大陆扩展到沿海岛屿以及南海海域岛礁.测量技术和使用仪器堪称世界一流.测量周期由10年缩短为5年,可与世界发达国家相比(中国地球物理学会,2012).

如果我们能建立起复测点数量合理,分布均匀,数据可靠的地磁复测点网,这将大大提高研究我国地磁场时空分布规律的水平.地磁复测点可以视为地磁台站空间分布不均匀的合理而有效的补充(Newitt et al., 2002; Jankowski and Sucksdoff, 1999).地磁台数据和地磁复测点数据结合在一起使用,才能建立起高精度的地磁长期变化模型,只使用三十几个地磁台数据很难控制中国地区地磁场的时空变化.我国应尽快建立地磁复测点网.

6.2 关于地磁模型

建立区域地磁模型的数学方法多种多样.常用的有以下几种:泰勒多项式方法(安振昌等,1991;徐元芳等,1994;安振昌,2001)、球冠谐分析方法、矩谐分析方法(徐文耀和朱岗崑,1984;朱岗崑和徐文耀,1985;王月华等,1999)、自然正交分量方法(徐文耀,2002;王月华,2002;顾左文等,2009)和曲面 Spline

方法.我们认为球冠谐分析方法和曲面 Spline 方法在中国地磁模型建立中是很好的方法,其成功使用也标志着我国地磁建模工作水平达到了世界先进水平.曲面 Spline 方法是一种插值方法,我们用曲面 Spline 方法代替人工手绘地磁图的方法,取得满意的效果(安振昌等,2004;高金田等,2006;陈斌等,2010).球冠谐分析方法是一种拟合方法,有严格的数理依据,是表示区域地磁场及其长期变化时空分布的一种好方法(安振昌,1993;顾左文等,2004,2006).

在建立地磁场球冠谐模型时,为了进一步提高模型的精度,以下两点尚须注意:一是要考虑各个测点的海拔高度(不能简单地都取作零海拔高度);二是在计算周边地区地磁场值时,不要使用只表示地球主磁场分布的 IGRF 模型,而要使用不仅能表示主磁场而且能表示岩石圈磁场分布的全球地磁模型.

6.3 关于地磁图

编绘地磁图有两个途径:一是根据地磁测量数据,直接编绘地磁图;二是根据地磁测量数据先建立地磁模型,再根据地磁模型绘制地磁图.20世纪90年代以前,我国都是基于地磁测量数据,直接编绘地磁图(中国科学院地球物理研究所,1955,1964,1969,1973,1982).20世纪90年代以后,我国是先建立地磁模型,再编绘地磁图.1993年,夏国辉等人首次根据地磁场泰勒多项式模型编绘出版1990年中国模型地磁图(中国科学院地球物理研究所,1993;夏国辉等,1988).2000年中国模型地磁图也是根据地磁场泰勒多项式模型编绘的(中国科学院地质与地球物理研究所,2004;Xu et al., 2003).2005年顾左文、高玉芬、安振昌等首次使用球冠谐分析方法和曲面 Spline 方法编绘2005年中国地磁图,这两种地磁图的等变线都是根据球冠谐长期变化模型绘制的(中国地震局地球物理研究所,2005;陈斌等,2011).中国地震局地球物理研究所于2011年1月编印出版2010.0年中国地磁图,包括两种数学模型地磁图.一种是球冠谐模型地磁图,一种是曲面 Spline 模型地磁图,上述两种模型图均根据泰勒多项式长期变化模型绘制等变线(中国地震局地球物理研究所,2010).

不管用什么方法编绘地磁图,每一幅正式出版的中国地磁图均包括等值线和等变线两种曲线.等值线表示地磁场的空间分布,等变线表示地磁场长期变化的空间分布.需要注意的是绘制地磁场等值

线的地磁模型,与绘制地磁场长期变化等变线的数学模型应当源于同一种数学方法,而不是两种不同的数学方法,以保证在同一幅地磁图上两种建模方法(地磁场内源磁场模型和长期变化模型)的一致性。如果使用球冠谐分析方法编绘中国地磁图(模型图),不仅要使用球冠谐模型绘制等值线,而且也要使用球冠谐长期变化模型绘制等变线。同样,如果使用曲面 Spline 方法绘制中国地磁图(模型图),则应该使用地磁内源场和长期变化的曲面 Spline 模型分别绘制等值线和等变线。地磁场全球模型 IGRF 均使用球谐分析方法表示主磁场及其长期变化的时空分布(Finlay et al., 2010)。

致谢 衷心感谢中国地球物理学会秘书长郭建及原秘书长曲克信的建议与支持。衷心感谢中国地球物理学会办公室董静与中国地球物理数据中心及中国科学院空间科学数据库项目组杨京凤的具体帮助。

References

- An Z C. 1993. Spherical cap harmonic analysis geomagnetic field for China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 36(6): 753-764.
- An Z C. 1995. Regional and global geomagnetic field models. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 10(3): 63-73.
- An Z C. 1999. Geomagnetic surveys and geomagnetic charts and geomagnetic studies in China for 1950—2000. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 14(4): 75-88.
- An Z C. 2001. Analyses and discussions of the geomagnetic field polynomial models. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 44 (Suppl.): 45-50.
- An Z C. 2002. Review of geomagnetic surveys, geomagnetic charts and geomagnetic field models in China. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 45(Suppl.): 189-196.
- An Z C. 2003a. Spherical cap harmonic model of the Chinese geomagnetic reference field for 1936. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 46(5): 624-627.
- An Z C. 2003b. Spherical cap harmonic analysis of the geomagnetic residual field in China for 1950—1990. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 46(6): 767-771.
- An Z C, Gu Z W, Xia G H, et al. 2004. Surface Spline applied to the geomagnetic field and its anomaly field in China for 1970. //Zhang Z J eds. *Research on Deep Earth Structure and Dynamics of China Continental*. Beijing: Science Press. 896-907.
- An Z C, Ren G T, Xue X Z, et al. 1985. Geomagnetic field of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Qomolangma Feng (Mount Julmo Lunhama) Region. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 28(Suppl.) 226-233.
- An Z C, Xu Y F, Wang Y H. 1991. Derivation and analysis of the main geomagnetic field models in China for 1950—1980. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 34(5): 585-593.
- An Z C, Xu Y F, Xia G H, et al. 1982. Mathematical methods to express the distribution of geomagnetic field and its secular variation in a local area. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 25(Suppl.): 711-717.
- Brown F C, Kwei C T. 1933. Results of Magnetic observation in North China. *Acta Physica Sinica*, 1(1): 91-94, 99.
- Burgaud S J, Lu R Z. 1937. Geomagnetic chart in China. *Zikawei Observatory Geomagnetic Bulletin*, 40: 1-74.
- Carnegie Institution of Washington. 1911. Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Carnegie Institution of Washington, Vol. I. 1905-1910.
- Carnegie Institution of Washington. 1914. Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Carnegie Institution of Washington, Vol. II, 1911-1913.
- Carnegie Institution of Washington. Dept. 1921. Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Carnegie Institution of Washington; Nabu Press, Vol. IV, 1914-1920.
- Carnegie Institution of Washington. 1927. Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Carnegie Institution of Washington, Vol. VI, 1921-1926.
- Chapman S, Bartels J. 1940. *Geomagnetism*. Oxford, Vol. 1: 42-45.
- Chen B, Gu Z W, Gao J T, et al. 2010. Study of geomagnetic secular variation in China. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 53(9): 2144-2154.
- Chen B, Gu Z W, Gao J T, et al. 2011. Analyses of geomagnetic field and its secular variation over China for 2005.0 epoch using Spherical Cap Harmonic method. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 54(3): 771-779.
- Chen P C. 1944. A summary review on geomagnetic survey in China. *Academic Transactions, Academia Sinica*, 1(2): 99-126.
- Chen P C. 1949. A detailed geomagnetic survey of Pehpei District, Szechuan, China. *J. Chinese Geophys. Soc.*, 1(2): 177-186.
- Chen P C, Liu C L. 1948. Preliminary report on the results of geomagnetic survey in China, 1946—1947. *J. Chinese Geophys. Soc.*, 1(1): 78-87.
- Chinese Geophysical Society. 2012. *Discipline History of Geophysics in China*. Beijing: China Science and Technology Press.
- Finlay C C, Maus S, Beggan C D, et al. 2010. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophys. J. Int.*, 183(3): 1216-1230.
- Gao J T, An Z C, Gu Z W, et al. 2006. Distributions of the geomagnetic field and its secular variations expressed by the surface Spline method in China (a part) for 1900—1936. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 49(2): 398-407.
- Gu Z W, An Z C, Gao J T, et al. 2004. Spherical cap harmonic analysis of the geomagnetic field in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 47(6): 1003-1008.

- Gu Z W, An Z C, Gao J T, et al. 2006. Computation and analysis of the geomagnetic field model in China and its adjacent area for 2003. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 28(2): 141-149.
- Gu Z W, Chen B, Gao J T, et al. 2009. Research of geomagnetic spatial-temporal variations in China by the NOC method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(10): 2602-2612.
- Gui Z T (Kwei C T). 1986. *Geomagnetism and Radio Wave Propagation in Ionosphere* (in Chinese). Wuhan University Press.
- Haines G V. 1985. Spherical cap harmonic analysis. *J. Geophys. Res.*, 90(B3): 2583-2592.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1955. 1950. 0 Geomagnetic Field Map of Republic of China.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1964. 1960. 0 Geomagnetic Field Map of Republic of China.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1969. Geomagnetic Field Map of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1973. 1970. 0 Geomagnetic Field Map of China.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1982. 1980. 0 Geomagnetic Field Map of China.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1993. 1990. 0 Geomagnetic Field Map of China.
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 2004. 2000. 0 Geomagnetic Field Map of China.
- Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2005. 2005. 0 Geomagnetic Field Map of China. Chinese Maritime Books Publishing House.
- Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2010. 2010. 0 Geomagnetic Field Map of China.
- Jankowski J, Sucksdoff C. 1999. *Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice* (in Chinese). Seismological Press.
- Liu C L, Lee S P. 1948. Geomagnetic survey in Southwestern China, 1940—1943. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1(1): 68-77.
- Lü P X. 1933. Report of geomagnetic survey in coastal areas in Shandong by Tsingtao Observaory. Tsingtao Observaory.
- Newitt L R, Barton C E, Bitterly J. 2002. *Guide for Magnetic Repeat Station Surveys* (in Chinese). Li Q trans. Seismological Press.
- Observatoire de Zi-Ka-Wei. 1909. *Observations Magnétiques*. Tome 1, Année 1909.
- Observatoire de Zi-Ka-Wei. 1923. *Observations Magnétiques*. Tome VIII, Année 1922-1923.
- Wang Y H, An Z C, Golovkov V P, et al. 1999. The theoretical analysis of geomagnetic field over East Asia and rectangular harmonic model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 42(5): 640-647.
- Wang Y H. 2002. Regional orthogonal model of secular variation of the geomagnetic field in China during 1985—1997. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 45(5): 624-630.
- Vestine E H, Laporte L, Lange L. 1947. *Description of the Earth's Main Magnetic Field and its Secular Change, 1905—1945*. Washington D C: Carnegie Institution of Washington Publication.
- Xia G H, Zheng S L, Wu L L, et al. 1988. The geomagnetic field chart of China in 1980.0 and the mathematical model. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 31(1): 82-89.
- Xu W Y. 1994. Advances on geomagnetic studies in China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 37 (Suppl.): 284-294.
- Xu W Y. 1997. Advances on geomagnetic observations and studies in China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 40(Suppl.): 217-230.
- Xu W Y. 2002. NOC model of main geomagnetic field. *Science in China, Ser. D*, 32(7): 576-587.
- Xu W Y, Ou J M, Du A M. 2011. Geomagnetic field modelling for the globe and a limited region. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 26(2): 398-415.
- Xu W Y, Xia G H, An Z C, et al. 2003. Magnetic survey and China GRF 2000. *Earth, Planets and Space*, 55(4): 215-217.
- Xu W Y, Tschu K K. 1984. A study of the rha for the geomagnetic field of China and neighbouring region. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 27: 511-522.
- Xu Y F, An Z C, Rotanova N M, et al. 1994. Analysis of the geomagnetic secular variation in Eastern Asia during the last 30 year. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 37(Suppl.): 287-295.
- Tschu K K. 1950. Geomagnetic field in China. *Science in China Ser. A*, 1(1): 57-69.
- Tschu K K. 1979. On some advancement of Chinese geomagnetism and aeronomy during 1949—1979. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 22(4): 326-335.
- Tschu K K, Xu W Y. 1985. A nested geomagnetic model of China and neighbouring region. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 28(2): 133-141.

附中文参考文献

- 安振昌. 1993. 中国地区地磁场的球冠谐和分解. *地球物理学报*, 36(6): 753-764.
- 安振昌. 1995. 区域和全球地磁场模型. *地球物理学进展*, 10(3): 63-73.
- 安振昌. 1999. 1950—2000年中国地磁测量地磁图与地磁研究. *地球物理学进展*, 14(4): 75-88.
- 安振昌. 2001. 地磁场多项式模型的分析与讨论. *地球物理学报*, 44(增刊): 45-50.
- 安振昌. 2002. 中国地磁测量、地磁图与地磁场模型的回顾. *地球物理学报*, 45(Suppl.): 189-196.
- 安振昌. 2003a. 1936年中国地磁参考场的冠谐模型. *地球物理学报*, 46(5): 624-627.
- 安振昌. 2003b. 1950~1990年中国地磁剩余场冠谐分析. *地球物*

- 理学报, 46(6): 767-771.
- 安振昌, 顾左文, 夏国辉等. 2004. 用曲面 Spline 方法表示 1970 年中国地磁场和异常场分布. // 张中杰等主编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究. 北京: 科学出版社, 47(6): 61-66.
- 安振昌, 任国泰, 薛小桢等. 1985. 青藏高原及珠穆朗玛峰地区的地磁场. 地球物理学报, 28(增刊): 226-233.
- 安振昌, 徐元芳, 王月华. 1991. 1950—1980 年中国地区主磁场模型的建立及分析. 地球物理学报, 34(5): 585-593.
- 安振昌, 徐元芳, 夏国辉等. 1982. 表示局部地区地磁场及其长期变化分布的数学方法. 地球物理学报, 25(增刊): 711-717.
- Burgaud S J, 鲁如曾. 1937. 中国地磁图. 徐家汇验磁台地磁丛报, 40: 1-74.
- 陈斌, 顾左文, 高金田等. 2010. 中国地区地磁长期变化研究. 地球物理学报, 53(9): 2144-2154, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.014.
- 陈斌, 顾左文, 高金田等. 2011. 2005. 0 年代中国地区地磁场及其长期变化球冠谱和分析. 地球物理学报, 54(3): 771-779, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.017.
- 陈宗器. 1944. 中国境内地磁观测之总检讨. 中央研究院. 学术汇刊, 1(2): 99-126.
- 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. 地球物理学报, 49(2): 398-407.
- 顾左文, 安振昌, 高金田等. 2004. 京津冀地区地磁场球谱分析. 地球物理学报, 47(6): 1003-1008.
- 顾左文, 安振昌, 高金田等. 2006. 2003 年中国及邻区地磁场模型的计算与分析. 地震学报, 28(2): 141-149.
- 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. 地球物理学报, 52(10): 2602-2612, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.020.
- 桂质廷. 1986. 地磁及电离层电波传播. 武汉大学出版社.
- Jankowski J, Sucksdorff C. 1999. 地磁测量与地磁台站工作指南. 地震出版社.
- 吕蓬仙. 1933. 青岛市观象台测量山东沿海各地地磁力报告书. 青岛市观象台.
- Newitt L R, Barton C E, Bitterly J. 1996. 地磁巡回测量指南. 地震出版社.
- 王月华. 2002. 1985—1997 年中国地磁场长期变化的正交模型. 地球物理学报, 45(5): 624-630.
- 王月华, 安振昌, Golovkov V P 等. 1999. 东亚地区地磁场的理论与分析. 地球物理学报, 42(5): 640-647.
- 夏国辉, 郑双良, 吴莉兰等. 1988. 1980 年代中国地磁正常场图及其数学模式. 地球物理学报, 31(1): 82-89.
- 徐文耀. 1994. 中国地磁学研究的进展. 地球物理学报, 37(增刊): 284-294.
- 徐文耀. 1997. 我国地磁观测研究的发展. 地球物理学报, 40(增刊): 217-230.
- 徐文耀. 2002. 地球主磁场的 NOC 模型. 中国科学: D 辑, 32(7): 576-587.
- 徐文耀, 区加明, 杜爱民. 2011. 地磁场全球建模和局域建模. 地球物理学进展, 26(20): 398-415, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.002.
- 徐文耀, 朱岗崑. 1984. 我国及邻近地区地磁场的矩谱分析. 地球物理学报, 27(6): 511-522.
- 徐元芳, 安振昌, Rotanova N M 等. 1994. 近 30 年来东亚地区地磁长期变化分析. 地球物理学报, 37(增刊 2): 287-295.
- 中国地球物理学会. 2012. 中国地球物理学学科史. 北京: 中国科学技术出版社.
- 中国地震局地球物理研究所. 2005. 2005. 0 中国地磁图. 中国航海图书出版社绘制.
- 中国地震局地球物理研究所. 2010. 2010. 0 中国地磁图.
- 中国科学院地球物理研究所. 1955. 1950. 0 中华人民共和国地磁图.
- 中国科学院地球物理研究所. 1964. 1960. 0 中华人民共和国地磁图.
- 中国科学院地球物理研究所. 1969. 1965. 0 青藏高原地磁图.
- 中国科学院地球物理研究所. 1973. 1970. 0 中国地磁图.
- 中国科学院地球物理研究所. 1982. 1980. 0 中国地磁图.
- 中国科学院地球物理研究所. 1993. 1990. 0 中国地磁图.
- 中国科学院地质与地球物理研究所. 2004. 2000. 0 中国地磁图.
- 朱岗崑. 1950. 中国的地磁场. 中国科学, A 辑 数学, 1(1): 57-69.
- 朱岗崑. 1979. 三十年来我国地磁和高空物理学的进展. 地球物理学报, 22(4): 326-335.
- 朱岗崑, 徐文耀. 1985. 我国及邻近地区的嵌套式磁场模型. 地球物理学报, 28(2): 133-141.

(本文编辑 何燕)