



中国航空磁测资料数字化处理发端 ——泛华北航磁资料处理回顾与启示

骆 遥, 李敬敏, 张文志, 王林飞

中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

摘 要: 中国航空磁测经过 70 年不断发展, 基本实现陆域和海域的全覆盖, 航空磁测资料数字化处理起到了关键作用。作为我国航空磁测资料数字化处理的最初实践, 以侯重初为代表的老一辈地球物理学家依靠自主研发的位场转换程序完成泛华北航磁资料处理, 开启了我国航磁资料数字化处理的新征程, 为中国东部航磁解释和深部构造研究提供了素材, 在华北构造航磁研究中起到了关键作用。通过回顾我国航空磁测事业的发展历程, 总结历史经验和成功做法, 以期为新时期继续发展中国特色的航空磁测理论、方法、技术提供借鉴。

关键词: DJS-11 型计算机(150 机); 航空磁测; 数字化; 位场转换; 华北大地构造; 科学技术史

DIGITAL PROCESSING OF AEROMAGNETIC DATA IN CHINA: Review and Enlightenment

LUO Yao, LI Jing-min, Zhang Wen-zhi, WANG Lin-fei

China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, CGS, Beijing 100083, China

Abstract: The aeromagnetic survey in China has basically achieved full coverage of land and sea territory with 70 years of continuous development, owing to the essential contribution of digital processing of aeromagnetic data. As the initial practice of aeromagnetic survey data digital processing in China, the older generation of geophysicists, represented by Prof. Hou Chong-chu, have completed the aeromagnetic data processing in pan-North China with self-developed potential field transformation program, which started a new course of aeromagnetic data digital processing, supplied materials for aeromagnetic interpretation and deep structure research in eastern China, and played a key role in the aeromagnetic study of North China tectonics. By reviewing the development history of aeromagnetic survey in China, the paper summarizes historical experience and successful practices to provide reference for further development of aeromagnetic survey theory, method and technology in the new era.

Key words: DJS-11 model computer; aeromagnetic survey; digitization; potential field transformation; tectonics of North China; history of science and technology

0 引言

航空磁测能快速获取高精度的地磁场信息, 是在

深海、深地等领域战略高技术部署中具有突破性和先导性的关键技术之一^[1]。以航空磁测为代表的航空地

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-07-22。编辑: 黄欣。

基金项目: 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项项目(2017YFC0602000); 中国地质调查局项目“×××× 重点海域航空重磁精密测量”(DD20191001); “×××× 海域航空重磁精密测量”(DD20189410)。

作者简介: 骆遥(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事航空地球物理勘探工作, 通信地址 北京市海淀区学院路 31 号, E-mail: geophy@vip.qq.com

球物理勘查技术,是现代地质勘查的重要手段,被纳入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》优先支持。中国航空磁测始于1953年^[2],经过70年不断发展,成效显著。例如,1957年率先发现并命名郯庐断裂;1957年最早圈定大庆长垣构造带^[2-3];1959年发现济黄拗陷通向渤海与下辽河拗陷相连,为大型含油气盆地,直接促成了向海洋要石油的决策,中国海洋地球物理调查由此拉开序幕^[4]。至20世纪70年代,航空磁测已覆盖大部分国土^[3]。其中,中国沿海大陆架航空磁测面积1 200 000 km²^[5],接近海洋航空磁测的国际水平,在《联合国海洋法公约》签约生效前,为捍卫我国海洋权益赢得了先机。尽管1970年代的中国沿海大陆架航空磁测达到了空前水平,但仍是模拟测量。以侯重初为代表的老一辈航空地球物理勘探工作者在20世纪70年代末、80年代初开始了航磁资料数字化处理的探索与实践,利用自主研发的软硬件系统首次实现了泛华北地区的航磁资料数字处理,中国航磁资料数字化处理由此发端。随后,我国开展了第二代航空地球物理技术研究,成功研制HC-85航空氦光泵磁力仪,并出口美国。进入21世纪,又组织实施了“航空地球物理勘查技术系统”等重大项目,航磁三轴梯度和航磁三分量测量技术达到国际领先^[6-9]。航空磁测在找矿突破战略行动中发挥了重要作用,实现“当年飞行、当年查证、当年见矿”。

不忘初心,方得始终,40多年前侯重初等开启了我国航磁资料数字化处理的新征程,回顾这一里程碑事件,总结历史经验和成功做法,可望为新时代继续发展中国特色的航空地球物理勘查理论、方法、技术提供借鉴。

1 150 计算机及 150 工程

1946年第一台通用计算机ENIAC诞生,人类进入电子计算机时代。到20世纪60年代中期,进入集成电路与大规模集成电路计算机的时代。此时,西方地震和航空磁测数据的采集、处理与解释已采用电子计算机,而我国地球物理勘探领域仍在使用模拟资料,航空磁测亦为手工整理和成图。时不我待,为解决石油地球物理勘探数据处理问题,1968年石油工业部和第四机械工业部确定联合研制大型计算机,因该机备案编号为150,被称为150机。150机是我国自行设计

生产的第一台百万次运算能力集成电路计算机,后定名为DJS-11型大型数字电子计算机^[10]。1969年,国务院将其列为国家重点科研项目——150工程^[11]。150机研制由第四机械工业部738厂孙强南主持,操作系统由北京大学杨芙清负责^[12]。包括北京大学、738厂、石油工业部和地质部在内120余人参与了总体方案和技术路线的设计^[11]。

1973年8月27日,《人民日报》刊发了新华社讯《我国第一台每秒钟运算百万次的集成电路电子计算机试制成功》。150机字长48位,内部存储器容量13万字,浮点运算速度每秒100万次^[13]。整机规模庞大,需要近200 m²的机房(图1),售价高达1400万元^[10]。



图1 DJS-11型大型数字电子计算机(150机)

(据文献[10],照片原图由孙强南提供)

Fig. 1 DJS-11 model of large digital electronic computer

(From Reference [10], by courtesy of Sun Qiang-nan)

1973年10月10日第一台150机正式通过验收,交付石油工业部。1974年4月2日,150机地震数字处理程序系统^[14]处理出第一条数字地震仪器采集的海上数字地震剖面——南海II测线,被誉为“争气剖面”^[15]。以150机为起点,地震处理技术不断发展,为中国油气勘探做出了重要的贡献^[14]。第二台150机的用户为国家计划委员会地质局150工程组(地质矿产部北京计算中心前身)。1978年,150工程组侯重初团队率先完成了基于国产晶体管计算机DJS-6的位场转换系统,实现了位场的解析延拓、垂向导数计算、分量转换、磁化方向转换等功能^[16],并用于部分矿区位场资料试算。随着150机的引入,在电子计算机上实现航磁资料处理提上议事日程。1977年国家地质总局下达了“航空物探数据收录、整理、处理与成图自动化”项目,150工程组负责航磁资料处理、解释与成图工

作,依托 150 机百万次运算能力 1979 年上半年就完成了全年工作任务,并将任务书规定的一次处理 6.5 万数据量扩大到 13 万,首次实现了我国航磁资料大面积处理(泛华北地区,面积 1 800 000 km²). 150 机处理的这套图件由地质部航空物探大队(中国自然资源航空物探遥感中心前身)和计算技术应用研究所(原 150 工程组)印发,获得了广泛的应用和赞誉^[17]. 后续,150 机又生产了 2 台,分别交气象系统和江汉油田使用^[12]. 由于种种原因,以 150 机为代表的国产 DSJ 系列计算机在 20 世纪 80 年代中后期至 90 年代初全部退出历史舞台. 今天已经无法亲见 150 机,但作为我国第一台每秒钟运算百万次计算机,150 机试制成功是我国计算机发展史上的一个里程碑,为今后生产同类型或更大规模的计算机积累了宝贵经验. 为庆祝新中国成立 70 周年,中共中央党史和文献研究院编写了《中华人民共和国大事记(1949 年 10 月—2019 年 9 月)》,大事记中与计算机相关的仅 3 条,第一条就是 150 机试制成功.

2 泛华北航磁资料处理

20 世纪 70 年代,国际开展了地壳和上地幔结构研究. 1979 年我国编制完成了东北地区 1:1 000 000 航磁异常图,加上 1963 年编制的华北地区 1:1 000 000 航磁异常图,具备了开展地球深部构造研究的条件. 侯重初等基于 150 机研发的位场转换系统(150 程序)也为大面积航磁资料处理提供了技术保障. 从 1978 年下半年起对华北地区航磁资料进行的数据处理和深部构造研究,开创了我国数字化处理航空磁测资料的先河.

2.1 资料来源

资料处理选取地质、地球物理研究程度较高的泛华北地区作为研究区,坐标范围东经 107°—124°,北纬 32°—42°10′,覆盖面积约 1 800 000 km². 研究区按等角圆锥投影(中央经线 114°E)敷设公里格网,按东西向 300 点、南北向 240 点在 1:500 000 纸质航磁图等值线上取数,形成 5 km × 5 km 网格距的数据. 手工取数时,取样点如在等值线上,则取该值,否则按线性内插取值,其中磁场区平缓取值误差优于 5 nT. 由于已出版的航磁图均采用高斯投影,还涉及投影转换. 这里需要特别指出,历史上航空磁测中高斯投影到等角

圆锥投影转换问题一直无法有效解决,以致 1989 年出版的《中国及毗邻海区航空磁力异常图(1:4 000 000)》图面最大位置偏差近 40 km^[18]. 取数后,用纸带穿孔数据输入 150 机.

2.2 处理方法

针对深部构造研究的需求,进行了位场转换处理和磁性界面计算. 位场转换包括向上延拓、化极、水平方向导数计算、垂向导数计算、上延叠加处理、磁源重力异常计算. 处理时,使用 150 程序,并采用功率谱方法计算磁性块体的平均深度. 处理结果由 150 机形成等值线图,比例尺为 1:2 000 000. 最后将图件转绘在 B 型仪器展绘的等角圆锥投影底图上,形成正式图件. 表 1 列出了最终印发的图件.

除位场转换程序本身,转换参数的选取至关重要,涉及物理性质、处理精度、地质效果等方面的考量. 向上延拓中选择了 10 km、20 km、40 km 和 100 km 四个高度面. 考虑到解析延拓的物理意义,上延 20 km(考虑到原资料测量高度,此处更精确地表述为上延至距地球表面 20 km 理想观测平面的高度)相当于在 20 km 高空实施航空磁测,也相当于在地球表面进行磁测并将地下全部磁源向下移动 20 km. 正是出于这种考量,处理报告认为:延拓高度 10 km 相当于地壳上层花岗岩层的深度;20 km 相当于玄武岩层的深度;40 km 相当于莫霍界面的深度;100 km 相当于大气中间层向电离层过渡的高度,也相当于地壳向地幔过渡的深度. 需要指出的是,尽管解析延拓中考虑了上述高度本身的意义,但向上延拓对不同深度场源产生的磁场均起到衰减作用,只不过浅部场源产生的磁场较深部场源产生的磁场衰减得更快,并不能通过延拓提取某一深度或深度范围内场源产生的磁场. 尽管如此,泛华北航磁资料解释中 4 个延拓高度面的选取是在兼顾深部信息提取的同时,最大程度考虑了解释效果. 这也是泛华北航磁图件,特别是《泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 异常等值线图》(图 2)被地学界广泛引用的原因.

泛华北研究区东西跨经度 17°,南北跨纬度 10°,磁倾角范围 53°30′—57°00′,磁偏角范围 -3°00′—-7°30′,如此大范围处理需要考虑变倾角化极(differential reduction to the pole, DRTP). 彼时尚未发明任何一种 DRTP 方法^[19-23],而分块或分带化极拼接必定影响深

表 1 泛华北航磁资料处理印发图件

Table 1 Maps by aeromagnetic data processing in pan-North China region

编号	图名	处理方法
1	泛华北地区航磁 ΔT 上延 20 km 异常等值线图	向上延拓
2	泛华北地区航磁 ΔT 上延 40 km 异常等值线图	向上延拓
3	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 10 km 异常等值线图	向上延拓、化极
4	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 异常等值线图	向上延拓、化极
5	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 40 km 异常等值线图	向上延拓、化极
6	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 0° 方向水平异常等值线图	向上延拓、方向导数
7	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 45° 方向水平异常等值线图	向上延拓、方向导数
8	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 90° 方向水平异常等值线图	向上延拓、方向导数
9	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 315° 方向水平异常等值线图	向上延拓、方向导数
10	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 垂向导数异常等值线图	向上延拓、方向导数
11	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 导数模异常等值线图	向上延拓、梯度模
12	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 40 km 导数模异常等值线图	向上延拓、梯度模
13	泛华北地区航磁 ΔT 假重力异常等值线图	磁源重力异常
14	泛华北地区深部磁性块体平均深度图	功率谱法
15	泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 100 km 异常图	向上延拓、化极

注:表中将原图名中“公里”改为“km”。

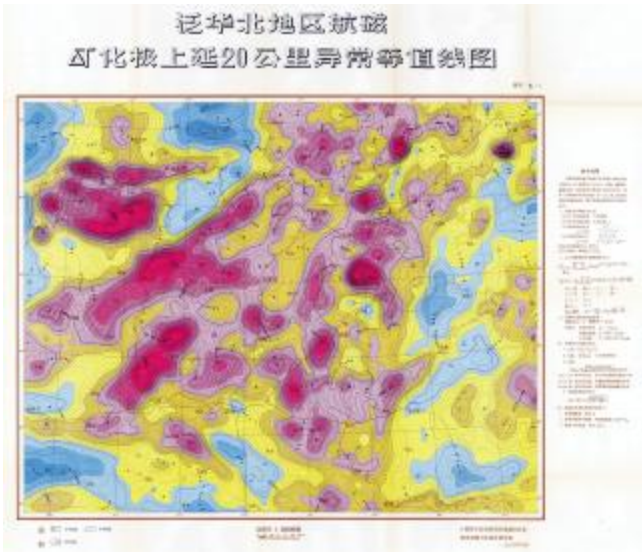


图 2 《泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 异常等值线图》

Fig. 2 Contour map of aeromagnetic anomaly in pan-North China with upward continuation of 20 km reduced to pole

部构造的长波磁场信息,实际处理中采用了一种更简便的做法,化极试算了 $53^{\circ}30'$ 和 $57^{\circ}00'$ 两种极限磁倾

角的化极情况,并同研究区中部磁倾角 $53^{\circ}40'$ 化极结果进行比较.由于还附加了大跨度的向上延拓,上述化极结果的差异并不大,故处理中采用磁倾角 $53^{\circ}40'$ 、磁偏角 -4° 的常规频率域化极处理.

磁源重力异常计算也使用了前述的磁倾角、磁偏角,相对密度差取 0.3 g/cm^3 ,磁化强度差取 1 A/m .水平方向导数计算选取了 0° 、 45° 、 90° 和 315° 四个方向,同垂向导数计算一样,为了减少干扰,处理中施加了余弦形式的圆滑因子.同时,通过垂向导数和水平导数计算了 ΔT 的总梯度模.此外,处理中还利用了径向对数功率谱计算了深部磁性块体平均深度,共 667 点,绘成 2 km 等值线间隔的深度图,其中滑动窗口 100 km,窗口重叠部分 50 km.

2.3 处理效果

现今看来,上述方法只是常规的位场转换,但回望航磁处理发展历程,国际上直到 1975 年才由 Gunn 概括了通用位场表达式^[24],侯重初等独立于西方建立了一套更全面的位场转换系统.地质认识间接体现了资

料的处理效果,泛华北航磁资料解释率先使用向上延拓解释深部构造,给出了华北块体的宏观面貌和内部结构,明确了郯庐断裂带的性质,并对大同-吴起断裂、北秦岭断裂等在航空磁测资料上的显示也提出了新见解,其中关于华北深部结构的认识得到地学界的认可,解释中还引入深部磁性块体深度,绘制了华北地区区分花岗岩层和玄武岩层的磁性界面,提出深部“断块隆起”“凹槽”的概念,并就其与地壳结构、地震和内生矿产的联系进行了探讨^[25],磁性界面深度计算方法经不断完善,最终形成了我国航磁资料计算居里面深度的技术体系^[26],总之,泛华北地区航磁资料数据处理及综合研究中,理论方法上有创新,技术上有突破,地质解释上有新认识,形成一套独立自主的150机航磁处理解释系统,首开我国航空地球物理资料数字化处理先河。

3 航磁资料应用成效

3.1 地质认识

磁测资料对华北板块地质认识及地质找矿均具有重要意义^[27-28],提及华北航磁解释,首推1979年朱英《华北地块的大地构造和鞍山式铁矿的分布规律——根据航空磁测结果的初步分析》一文^[29],黄汲清指导、任纪舜等执笔的《中国大地构造及其演化——1:400万中国大地构造图简要说明》近乎全文引用朱英对华北基底构造岩相的分区结果^[30],该分区结果主要参考的是1:1 000 000华北和东北的航磁异常图,后续朱英又将其深化,形成了中朝准地台三分的观点,即大同-吴起断裂和郯庐断裂将中朝准地台自西向东分割为包银地块、华北地块、胶辽地块^[31],作为我国航空磁测事业创始人之一,朱英多次使用泛华北成果图件,尽管他反对航磁化极^[18],但仍将《泛华北地区航磁 ΔT 化极上延40 km异常等值线图》引进至马杏垣主编的《中国岩石圈动力学地图集》(国际岩石圈计划出版物0125号)^[32],可见该资料处理质量之高、效果之妙,此外,泛华北成果图件还被编入教科书,例如车自成等编著的《中国及其邻区区域大地构造学》也直接引用了《泛华北地区航磁 ΔT 化极上延20 km异常等值线图》^[33]。

华北航磁解释的另一经典是管志宁1987年发表《磁性界面反演及华北地区深部地质构造的推断》^[34],文中给出了华北地区深层磁性界面等深度图,根据界

面隆起指出在辽宁的鞍(山)本(溪)、清源,冀东的迁安、承德,以及内蒙古的集宁、东胜存在古陆核,并推断华北地台中西部的临汾、岚县两地存在古陆核,该研究始于王懋基领衔的“中国东部区域地球物理对地质构造和矿产预测研究”课题(地质部1981年下达),1984年管志宁用匹配滤波和频率界面反演完成了华北地区深层磁性界面等深度图,但平均深度取18 km,比文献^[34]中平均深度(16 km)深,故界面深度较文献^[34]的界面深度略深,比如临汾的深层磁性界面深度在14~15 km,而文献^[34]深度为10~11 km,但二者界面起伏的趋势相同,实际上,这项研究继承了泛华北航磁资料处理的思想甚至做法,例如,研究中编制的《中国东部地区航磁 ΔT 上延20 km等值线图》,笔者曾将其同泛华北成果图件进行过详细比较,华北部分基本相同。

前寒武纪地质学家白瑾高度重视华北地区深层磁性界面这一结果,他结合上述成果,将华北克拉通划分出东胜、临汾、济宁、渤海、赤峰和辽东6个古陆核,指出磁性界面的隆起区同绿岩带围限的陆核相对应^[35],提出中朝板块华北地区太古宙陆核的分布(图3),该结果被翟明国^[36-38]、万天丰^[39-40]、车自成^[33]等引用,成为华北前寒武纪研究中最重要地球物理素材,也是地质解释的经典范本,我们在前人研究的基础上叠加了泛华北地区航磁 ΔT 上延20 km数据,经6阶巴特沃斯低通滤波器提取波长大于200 km低频数据,彩色影像的磁力高同深层磁性界面隆起相对应(图3),对应古陆核,可见泛华北地区航磁 ΔT 上延20 km数据同文献^[34]磁性界面反演结果高度契合,表明泛华北航磁资料处理结果在今天华北地区深部构造及前寒武构造遗迹研究中仍具有重大意义。

泛华北航磁资料数字化处理已有40余年,所使用的数据甚至可以追溯到20世纪50年代,近些年来,华北地区高精度、大比例尺航磁资料不断更新,磁场的基本格架是否有了新的变化,是一个重大课题,为此,我们对泛华北地区航磁 ΔT 上延20 km数据进行数字化,并与国际上最新编制的磁异常网格EMAG2^[41-42]进行对比,EMAG2在中国陆域主要来自自然资源航空物探遥感中心同加拿大PGW公司和英国GETECH公司于1999年合作完成的中国航磁数字化编图资料,由于融合了卫星磁测的长波长背景,EMAG2

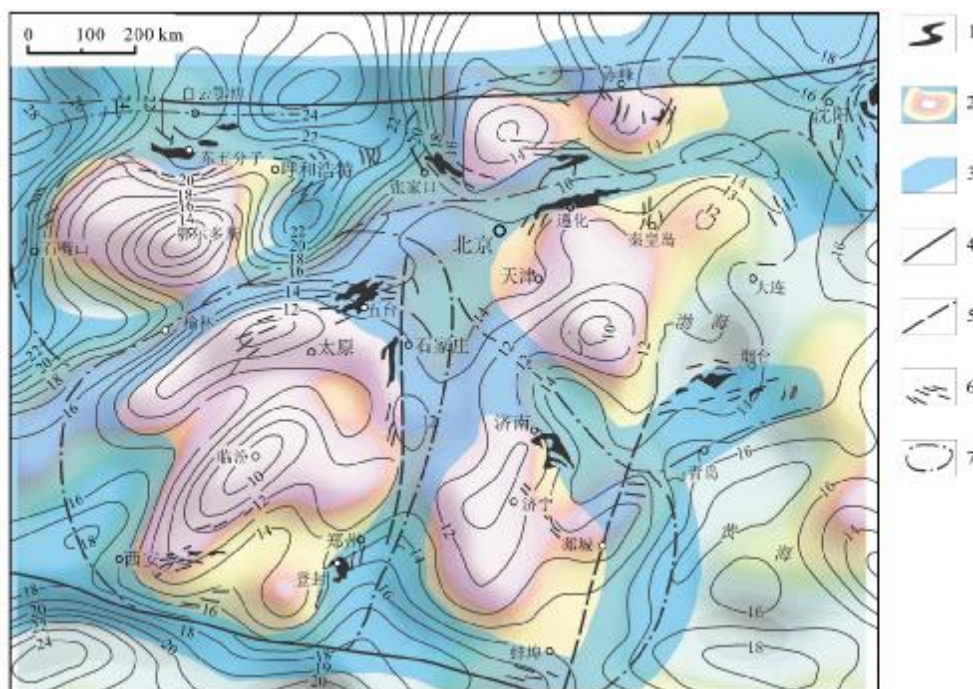


图3 中朝板块华北地区太古宙陆核分布及磁性界面深度

Fig. 3 Distribution of Archean continental nucleus in North China of Sino-Korean Plate and depth contour of magnetic interface

1—太古宙绿岩带(Archean greenstone belt); 2—磁性界面隆起区(uplift area of magnetic interface); 3—磁性界面凹陷区(depression area of magnetic interface); 4—华北板块边界(boundary of North China Plate); 5—深大断裂(deep fault); 6—片麻理走向(strike of gneissosity); 7—推测的陆核界线(inferred continental nucleus boundary). 其中矢量图来自文献[39], 叠加的彩色影像图为泛华北地区航磁 ΔT 化极上延 20 km 数据(暖色调为磁力高, 冷色调为磁力低, 波长大于 200 km) (The vector map is from reference [39], and the superimposed color image is aeromagnetic anomaly data in pan-North China with upward continuation of 20 km and reduced to pole, with warm color indicating high magnetism, cool color low magnetism, and wavelength greater than 200 km)

的磁场水平在全球都获得了更恰当的调整^[43], 图4给出了泛华北航磁化极上延 20 km 数据(等值线图)同 EMAG2 化极上延 20 km 数据(彩色影像)的对比, 二者趋势是一致的, 特别是磁异常梯度带的等值线密集处, 这清楚表明 40 多年来华北地区航磁总体格架没有改变, 尽管早期航空磁测资料不尽如人意, 但老一辈专家对磁异常的精确认知减少了相应误差甚至修正了错误, 最难能可贵的是保真了中长波航磁异常背景, 使得今天使用该成果图件研究区域大地构造问题仍具有现实意义。

初心不改, 40 年历久弥新, 当年华北大区航磁处理所奠定的基本大地构造格架没有动摇, 但也面临一些挑战, 泛华北资料处理(图 2、4)表明秦岭造山带的北界为铁炉子-三要-黑沟-栾川-南邵-方城断裂, 断裂以北块状正磁场区为华北板块, 以南负磁场区为秦岭造山带。近年来提出的华北板块与秦岭造山带的分

界线沿隆德-武功-三门峡或宝鸡-潼关-宜阳-鲁山断裂的“航磁新认识”仍待商榷。

3.2 航磁处理软件

软件成果是泛华北航磁资料处理留给今天的又一宝贵财富。泛华北航磁资料处理使用的 150 程序是建立在国产百万次集成电路电子计算机 DJS-11 上的, 最初源自侯重初领导的科研团队建立在国产 DJS-6 计算机的位场转换系统。150 程序全部使用符号汇编语言编写, 模块结构, 具有联接编辑功能。1980 年, 地质部地球物理化学探矿局为航磁专题组颁发奖状。随后, 地质部颁发嘉奖令: “在地质找矿工作中做出重大贡献, 特予嘉奖”, 专题组被评为有重大贡献的集体^[17]。1982 年, 150 机更换内存, 加装进口磁带机和磁盘。侯重初等考虑到内存和外设的可用性, 于 1983 年初用磁盘和 Eklundh 算法^[44]实现了更大规模的二维快速傅里叶变换(FFT)。1984 年扩展了数据处理量, 并实现了

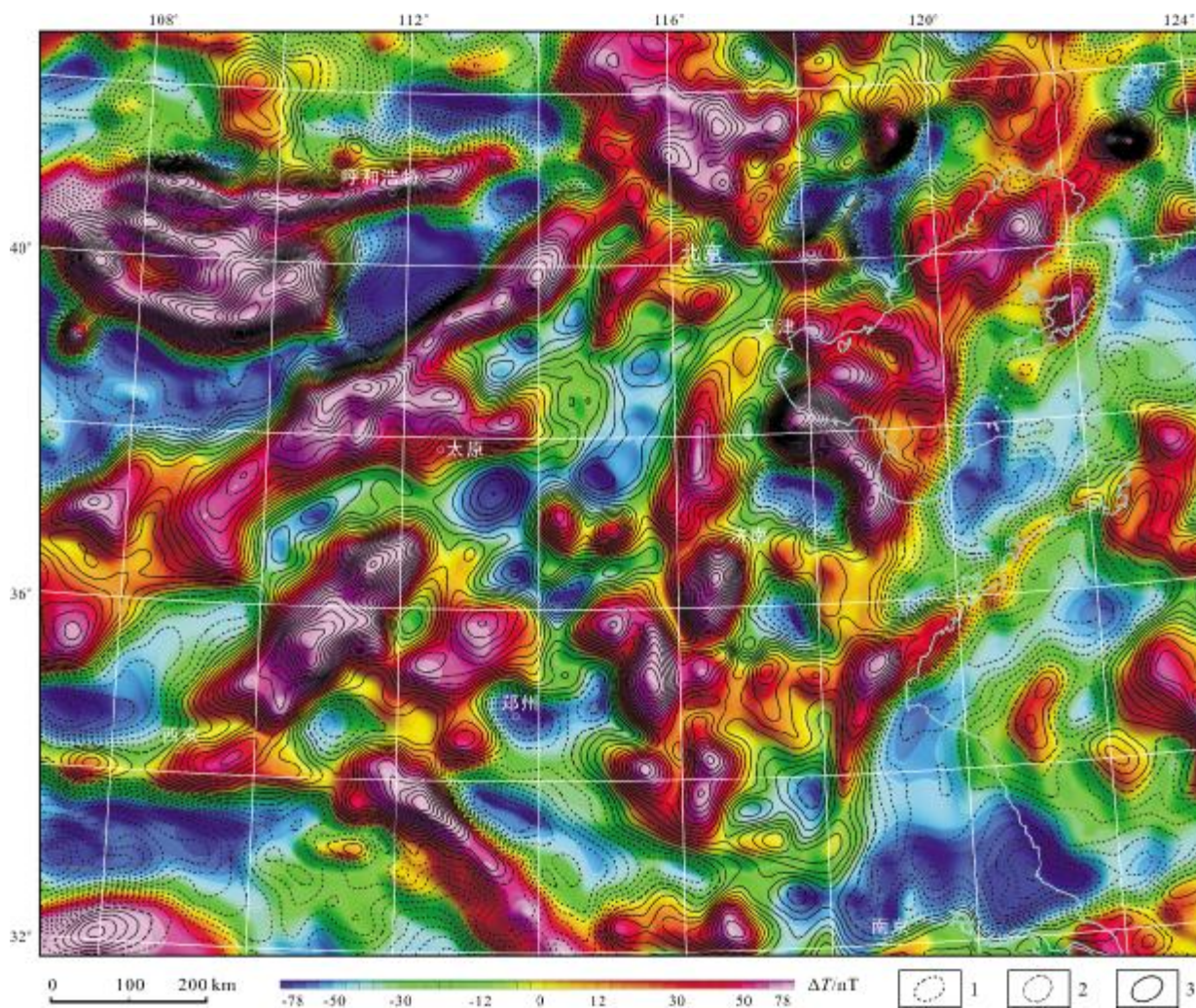


图4 泛华北航磁化极上延 20 km 等值线图(等值线间隔 10 nT)与 EMAG2 化极上延 20 km 彩色影像图对比

Fig. 4 Comparison of aeromagnetic contour (interval of 10 nT) in pan-North China and EMAG2 color image with upward continuation of 20 km reduced to pole

1—等值线负值(negative contour); 2—零等值线(zero contour); 3—等值线正值(positive contour)

更大面积的航磁资料处理(中国东部, 52 万数据量)。建立在 150 机上的航磁资料处理、解释系统累计处理了 48 个地区的航磁资料, 成效显著^[47]。1985 年, “航磁资料处理解释系统”和“泛华北航磁资料数据处理中的方法研究与计算”均荣获地质矿产部科技成果三等奖。同年“建立在国产 150 机上的航磁资料处理、解释系统”由地质矿产部物探局组织专家评审与验收, 并希望向用户转移。

1985—1986 年, 张庆合、李燕、姜兰将其改用 Fortran 77 语言编制, 移植到 SEL 32/57 计算机上, 数据处理量 26 万。SEL 32/57 计算机 1982 年由地质矿产部航空物探总队引进, 同时还引进了航空物探数据

处理与成图系统, 包括加拿大 PGW 研制的 MAGMAP 位场转换程序。后续, 总队在 SEL 32/57 计算机上引入了长春地质学院的位场转换程序(长地院程序), 这套 Fortran 77 程序由孙运生于 20 世纪初赴加拿大进修带回, 后改进用于教学和生产。因此, 1980 年代航空物探总队 SEL 32/57 计算机上并存有 3 套位场转换系统, 即 PGW 的 MAGMAP 程序、150 程序和长地院程序。总队曾对这 3 种程序进行比较, 计算结果图形大体一致, 但 MAGMAP 滤波窗口较小, 造成结果较复杂; 长地院程序以计算视磁化率为主, 计算效果最佳; 150 程序则可以一次计算若干位场转换结果。总体认为 150 程序易于掌握、使用灵活、功能齐全, 值得推广。

关于 MAGMAP,这里还要略作补充. 1986 年, PGW 的 Ian MacLeod 和 Colin Reeves 联合创建了 Geosoft 公司, 开发的 Oasis Montaj 现已成为地球物理软件行业的标杆. 从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初, PGW 开发的许多程序都集成到 Oasis Montaj, 包括 MAGMAP 在内的一些程序被认可为地球物理解释的工业标准^[4].

20 世纪 80 年代后期, 航空物探遥感中心承担了地质矿产部科研项目“第二代航空物探方法技术及应用研究”, 该项目主要为“第二代航空物探调查”提供新装备、新方法、新技术, 通过引进和自研相结合, 解决航空物探测量数据处理、解释中的重大技术问题, 使过去难以进行高精度航空物探调查的沙漠、海洋、高山区以及各种不同调查性质的高精度大比例尺航空物探调查任务得以顺利执行, 为国民经济建设寻找新的矿产资源基地作出贡献^[45]. 该项目于 1989 年正式引进 IBM 4341 计算机和航磁数据物理解释软件, 考虑节约外汇, 没有引进位场转换软件. 刘浩军等将 SEL 32/57 计算机上的长地院程序移植到了 IBM 4341 机上, 并执行塔里木地区 1:200 000 高精度航磁测量的数据处理任务. 当时 SEL 32/57 计算机上并存 3 套位场转换系统, 但考虑程序处理效果特别是程序移植难度, 选择了当时消化程度最高的长地院程序. 移植中保留了原位场转换算子程序, 改用了 IBM 4341 计算机引进的子程序 FDG2C 进行扩边填“假值”, 并将数据存取方式改为按列随机存取, 大幅减少了 FFT 所占内存, 将数据处理量提升至 2048×2048 (400 万数据量), 移植后的 Fortran 77 程序全部采用双精度类型.

进入 20 世纪 90 年代中期, IBM 4341 机面临淘汰, 航空物探遥感中心通过“航空物探微机解释处理与成图系统的研制”项目将 IBM 4341 的程序向 DOS 操作系统移植, 形成了 DOS 版航空物探数据处理系统, 位场转换就是其中最重要的程序. DOS 版航空物探数据处理系统, 让我国航空物探数据处理迈入微型计算机时代. 进入 21 世纪, 随着“新一轮国土资源大调查”的开展, 航空物探遥感中心承担中国地质调查局“Windows 系统下航空物探软件系统的研制”项目, 刘浩军和薛典军等实现了软件系统由 DOS 版向 Windows 版升级, 同时开发了多款航空物探生产急需的方法技术软件, 形成了具有自主知识产权的基于 Windows 平台的航空物探软件系统——空中探针^[46].

该软件中位场转换程序继承了 DOS 程序, 形成了 6 类 20 种转换处理方法, 是国内功能最全、效果最优的位场转换程序. 目前, 通过“863”计划“航空地球物理勘查技术系统”重大项目支持, 已将空中探针软件升级为 GeoProbe Mager 地球物理数据物理解释软件. 经郭志宏等扩展, 位场转换程序数据处理网格大小可达 16384×16384.

从位场转换程序的发展脉络上看, 似乎自 IBM 4341 计算机, 150 程序便销声匿迹, 实则不然. 侯重初等在 150 程序中建立的部分位场转换算子沿用至今, 其一次同时实现多种位场转换的思路也得到继承. 空中探针的位场转换程序界面(图 5)表明程序可以对位场网格进行包括解析延拓、求导、化极等一系列连续操作, 一次实现多种位场转换. 现今程序还包含了侯重初等提出的“补偿圆滑率”“上延叠加”“任意磁化方向转换”等位场处理算子. 得益于不断继承和发展 150 程序及其研发思想, 空中探针和后续 GeoProbe Mager 软件中位场转换程序才成为国内功能最齐全、处理效果最优的位场转换程序.

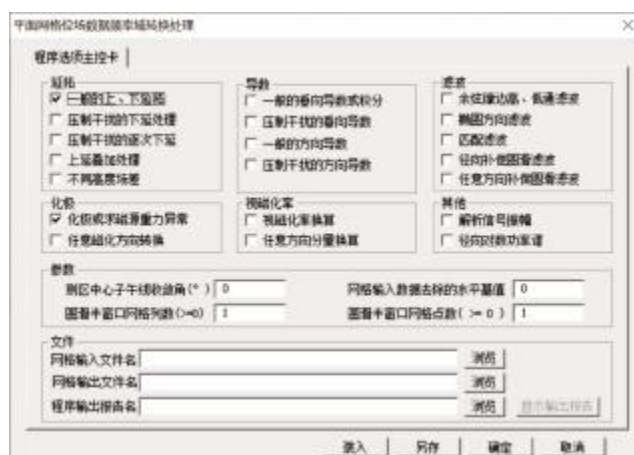


图 5 空中探针位场转换程序界面

Fig. 5 Interface of potential field transformation program in aerial probe software

4 启示与感怀

回顾 150 程序研发历程和泛华北航磁资料处理史实, 我们深感地球物理科研与生产必须紧密结合, 才能不断提出新课题, 改进老方法, 提供新方法, 发现与解决新问题, 使科研成果得到推广应用. 同时, 现代应用科学往往是综合性的, 必须有各种专业特长的人员默

契合作,150 程序的建立过程就是地球物理、数学与计算机专业人员密切配合的过程。这也是侯重初完成该成果后的总结与体会。

20 世纪 70 年代末至 80 年代初,以侯重初为代表的老一辈科学家敏锐地注意到电子计算机在航空磁测数据采集、处理、成图、解释中的应用前景并开创了奠基性工作。四十年弹指一挥间,经过科技工作者的不断努力,我国的航空磁测已经实现了数据收录数字化、仪器测量自动化、处理解释成图微机化。当前,我国开启全面建设社会主义现代化国家新征程,对地质工作涉及的能源、资源、环境、生态等问题提出更高的要求。航空磁测在上一轮找矿突破战略行动中发挥了重要作用,如何在新一轮找矿突破战略行动中发挥先导性作用,是一个重要的现实问题。当前,以航空磁测为代表的航空地球物理勘查技术,正面临着新的机遇与挑战。例如,美国针对关键矿产清单正在推进“地球测绘资源计划”(Earth Mapping Resources Initiative, Earth MRI),以开展大规模航磁和航空放射综合站测量为突破,推进关键矿产勘查。当今航磁面临的主要挑战包括测量参量的多源化、仪器设备小型化、飞行平台自动化以及地质解释智能化。尽管面临新的挑战,但我国航空磁测长期坚持自主创新,是最有基础也是最有希望率先突破全流程的自动化生产,并向智能化发展的地质调查手段之一。以数字化转型、信息化服务整体驱动地质调查方式的变革将成为未来的发展方向。下一步航空地球物理勘查技术的发展将与北斗卫星导航、5G 通信、区块链等新技术紧密结合,协同无人机、无人船等新型采集平台,实现对地球物理场联网测量与监测。通过人工智能、大数据、云计算实现地球物理场快速自动解释,并结合虚拟现实和增强现实技术进行以专家为中心的综合人机交互解释,形成快速反应、实时共享、天地融通的航空地球物理勘查和系统平台。通过全流程数字化生产、服务、共享的技术体系实现数据采集、处理、分析、解释、归档各阶段数据资源的实时汇聚和发布,为服务能源资源安全保障、生态文明建设、自然资源综合管理,加快构建新发展格局、推动高质量发展提供有效支撑。

5 结语

我国航空磁测事业走过了 70 年的光辉历程,仍焕

发青春。回顾走过的道路,立足勘探实际、坚持自主创新一直是我們不断向前的根本所在。40 多年前老一辈地球物理学家审时度势,发展了第二代航空物探技术,这其中侯重初领导的 150 系统直接引领了我国航空磁测数字化处理的开展。新世纪以来,我国成功研发出 HC-2000 航空氦光泵磁力仪;实现了全数字化的航空磁测;航磁梯度和航磁三分量测量技术世界领先;研发的 GeoProbe Mager 软件涵盖了处理航空重磁、电磁、放射性数据的全部功能,可比肩国外同类软件。进入新时代,党和国家赋予地质调查工作全新的使命和责任,面对新机遇、新挑战,我们必须不忘初心、迎难而上、守正创新,继承和弘扬老一辈航空地球物理勘探工作者的科学家精神,秉承科学报国的光荣传统,勇攀高峰,为发展中国特色的航空地球物理勘查理论、方法、技术做出新的贡献。

仅以此文纪念侯重初先生和她 70 年前参与创立并为之奋斗的新中国航空地球物理勘探事业!

致谢:2012 年翟明国院士热情回应第一作者关于《华北克拉通的形成以及早期板块构造》航磁资料笔误,促使我们近十年来不断探究华北大区航磁解释中涉及的重大地质问题及相关史实。原邮电部邮政研究所高级工程师徐祖哲先生为本文提供了 150 机照片和资料,中国地质大学(北京)万天丰教授提供图 3 的矢量图并允许发表,中国自然资源航空物探遥感中心刘浩军教授级高工曾多次向本文第一作者口述 IBM 4341 计算机及软件引进消化的相关情况。本文还参考了中国自然资源航空物探遥感中心教授级高工王懋基先生生前留存的部分珍贵资料,在此一并感谢。限于水平,本文某些认识乃至史实仍难免谬误。

参考文献(References):

- [1] 骆遥,蔡劭琨,吴美平,等.面向航空重磁测量的位场转换方法研究[M].北京:国防工业出版社,2020.
Luo Y, Cai S K, Wu M P, et al. Research on transformations of potential field data for aeromagnetic and airborne gravity survey[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [2] 黄汲清.中国地质科学的主要成就(四)[J].中国科技史料,1984,5(2): 26-46.
Huang J Q. China's major achievements in geological sciences (IV) [J]. China Historical Materials of Science and Technology, 1984, 5

- (2): 26–46. (in Chinese)
- [3] 杨光庆, 朱英. 中国地质普查勘探中的航空磁测工作[J]. 地球物理学报, 1979, 22(4): 374–382.
Yang G Q, Zhu Y. Aeromagnetic survey for geological reconnaissance work in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1979, 22(4): 374–382.
- [4] 张用夏. 中国海洋航空物探的发展与成果[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(3): 9–17.
Zhang Y X. Development and achievements of China airborne geophysical survey over offshore areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1989, 9(3): 9–17.
- [5] Zhang Y X, Yang H. Aeromagnetic survey and geological structure of offshore China[J]. Science Sinica (Series B), 1983, 26(9): 996–1008.
- [6] 骆遥, 段树岭, 王金龙, 等. AGS-863 航磁全轴梯度勘查系统关键性指标测试[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 620–625.
Luo Y, Duan S L, Wang J L, et al. Key indicators testing for AGS-863 three axis airborne magnetic gradiometer[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 620–625.
- [7] 骆遥, 王平, 段树岭, 等. 航磁垂直梯度调整 ΔT 水平方法研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3854–3861.
Luo Y, Wang P, Duan S L, et al. Leveling total field aeromagnetic data with measured vertical gradient[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3854–3861.
- [8] Luo Y, Wu M P, Wang P, et al. Full magnetic gradient tensor from triaxial aeromagnetic gradient measurements: Calculation and application [J]. Applied Geophysics, 2015, 12(3): 283–291.
- [9] Xie R K, Xiong S Q, Duan S L, et al. Noise estimation in vector magnetic data derived from airborne vector magnetic system [J]. Geophysics, 2020, 85(4): J71–J83.
- [10] 徐祖哲. 溯源中国计算机[M]. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 2015.
Xu Z Z. Tracing the origin of computers in China[M]. Beijing: SDX Joint Publishing Company, 2015. (in Chinese)
- [11] 陈正清. 纪念图灵诞辰 100 周年所想到的——追忆我国第一台百万次集成电路电子计算机 150(DJS11)机的诞生[J]. 计算机教育, 2012, (11): 126–129, 140.
Chen Z Q. The 100th anniversary of Turing's birth: A review of the 150 (DJS11) computer, the first millionth integrated circuit electronic computer in China [J]. Computer Education, 2012, (11): 126–129, 140. (in Chinese)
- [12] 陈芳. 北京大学“200 号”与特殊年代的超级工程[J]. 北京观察, 2017(9): 66–70.
Chen F. No. 200 Computer of Peking University and super projects in special times[J]. Beijing Observation, 2017(9): 66–70. (in Chinese)
- [13] 电子仪器厂 DJS-11 机软件组. 150(DJS-11)机的软件[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1974(S1): 144–157.
Software Group of DJS-11 Computer. Software for the 150 (DJS-11) computer[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1974(S1): 144–157. (in Chinese)
- [14] 王宏琳, 罗国安. 国产地震处理解释软件的发展[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 325–331.
Wang H L, Luo G A. Seismic data processing and interpretation software progress in China[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(2): 325–331.
- [15] 王宏琳. 地震软件技术: 勘探地球物理计算机软件开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
Wang H L. Seismic software technology: Computer software development for exploration geophysics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 侯重初, 刘秀芳. 用二维富氏变换进行重磁位场的转换[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1978, 14(2): 54–69.
Hou C C, Liu X F. Potential field transform of gravity and magnetic data by Fourier transform[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1978, 14(2): 54–69. (in Chinese)
- [17] 蔡宗熹. 曲面上的位场理论及其在地球物理中的应用[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2002.
Cai Z X. Potential field theory on an uneven surface and its application in geophysics [M]. Zhengzhou: Henan Science & Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [18] 朱英. 中国及邻区大地构造和深部构造纲要——全国 1:100 万航磁异常图的初步解释[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2013.
Zhu Y. Framework: Geotectonic and deep crustal architectural features of China and some peripheral areas [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [19] Arkani-Hamed J. Differential reduction-to-the-pole of regional magnetic anomalies[J]. Geophysics, 1988, 53(12): 1592–1600.
- [20] Cooper G R J, Cowan D R. Differential reduction to the pole [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(8): 989–999.
- [21] Swain C J. Reduction-to-the-pole of regional magnetic data with variable field direction, and its stabilisation at low inclinations[J]. Exploration Geophysics, 2000, 31(1/2): 78–83.
- [22] Arkani-Hamed J. Differential reduction to the pole: Revisited [J]. Geophysics, 2007, 72(1): L13–L20.
- [23] Luo Y, Wu M P. Vector transformation and reduction to the pole for regional magnetic data with variable field direction [J]. Applied Geophysics, 2022, 19(1): 107–116.
- [24] Gunn P J. Linear transformations of gravity and magnetic fields [J]. Geophysical Prospecting, 1975, 23(2): 300–312.
- [25] 刘寿彭. 应用航磁资料研究华北地区深部构造的初步结果[J]. 物探与化探, 1981, 5(3): 129–137.
Liu S P. Preliminary results of the deep tectonics in North China by application of aeromagnetic data [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1981, 5(3): 129–137. (in Chinese)
- [26] 侯重初. 居里面深度图的计算与制作方法[J]. 物探化探计算技术,

- 1989, 11(4): 306–311.
- Hou C C. Method for calculating and compiling the map of curie-point surface[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1989, 11(4): 306–311.
- [27] 孙中任, 赵雪娟, 段会升, 等. 华北板块与西伯利亚板块缝合带之重磁证据[J]. *地质与资源*, 2020, 29(5): 461–466.
- Sun Z R, Zhao X J, Duan H S, et al. Gravity and magnetic evidences for the suture zone between North China Plate and Siberian Plate[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(5): 461–466.
- [28] 林泽付, 邓昌州, 温丹, 等. 航空磁测在黑龙江伊春地区夕卡岩型锌多金属矿的找矿应用[J]. *地质与资源*, 2019, 28(2): 200–207.
- Lin Z F, Deng C Z, Wen D, et al. Application of aeromagnetic survey in skarn type zinc polymetallic deposit prospecting in Yichun area, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(2): 200–207.
- [29] 朱英. 华北地块的大地构造和鞍山式铁矿的分布规律——根据航空磁测结果的初步分析[J]. *物探与化探*, 1979, 3(1): 3–13.
- Zhu Y. Geotectonic of the North China Massif and distribution of the Anshan-type iron deposits: A preliminary analysis based on aeromagnetic survey[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1979, 3(1): 3–13. (in Chinese)
- [30] 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化——1:400 万中国大地构造图简要说说明[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- Ren J S, Jiang C F, Zhang Z K, et al. The geotectonic evolution of China[M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [31] 朱英. 中朝准地台大地构造和深部构造的若干问题——再论华北地块[J]. *物探与化探*, 1986, 10(4): 247–256.
- Zhu Y. Some problems concerning geotectonics and deep-seated structures of the Sino-Korean Paraplatform: A further discussion on North China Massif[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1986, 10(4): 247–256.
- [32] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1989.
- Ma X Y. Lithospheric dynamics atlas of China[M]. Beijing: Sinomaps Press, 1989.
- [33] 车自成, 罗金海, 刘良. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.
- Che Z C, Luo J H, Liu L. The regional tectonics of China and its neighbors[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [34] 管志宁, 安玉林, 吴朝均. 磁性界面反演及华北地区深部构造的推断[C]//王懋基, 程家印. 勘查地球物理勘查地球化学文集(第 6 集): 中国东部区域地球物理研究专辑. 北京: 地质出版社, 1987: 80–101.
- Guan Z N, An Y L, Wu C J. Magnetic interface inversion and deep structure inference in North China[C]//Wang M J, Cheng J Y. Contributions to the Exploration Geophysics and Geochemistry-6: Regional Geophysical Features of Eastern China. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 80–101.
- [35] 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 等. 中国前寒武纪地壳演化[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Bai J, Huang X G, Dai F Y et al. The Precambrian crust evolution of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. (in Chinese)
- [36] Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2000, 43(S1): 219–232.
- [37] Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 547–561.
- [38] 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1335–1349.
- Zhai M G. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1335–1349.
- [39] 万天丰. 中国大地构造学纲要[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- Wan T F. An outline of tectonics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [40] Wan T F. The tectonics of China: Data, maps and evolution[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [41] Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(8): Q08005.
- [42] Meyer B, Chulliat A, Saltus R. Derivation and error analysis of the earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3)[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(12): 4522–4537.
- [43] Luo Y. A huge gap of the lithospheric magnetic field model in the Qinghai-Tibet Plateau: Comment on “Characteristics of the crustal magnetic anomaly and regional tectonics in the Qinghai-Tibet Plateau and the adjacent areas”[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(9): 1623–1626.
- [44] Eklundh J O. A fast computer method for matrix transposing[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1972, C-21(7): 801–803.
- [45] 翟甲森. 第二代航空物探方法技术及应用研究[J]. *物探与化探*, 1992, 16(5): 398–400, 344.
- Zhai J S. Studies on techniques and application of the second generation aerogeophysical prospecting[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1992, 16(5): 398–400, 344.
- [46] 刘浩军, 薛典军, 郭志宏, 等. 航空物探软件系统研制[J]. *物探与化探*, 2003, 27(2): 146–149.
- Liu H J, Xue D J, Guo Z H, et al. The development of the aerogeophysical software system[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2003, 27(2): 146–149.