

doi: 10.12029/gc20180402

熊盛青, 杨海, 丁燕云, 李占奎. 2018. 中国航磁大地构造单元划分[J]. 中国地质, 45(4): 658–680.

Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2018. Subdivision of tectonic units in China based on aeromagnetic data[J]. Geology in China, 45(4): 658–680(in Chinese with English abstract).

# 中国航磁大地构造单元划分

熊盛青<sup>1,2</sup> 杨海<sup>1,2</sup> 丁燕云<sup>1</sup> 李占奎<sup>1</sup>

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 本文以我国截止到 2011 年基本覆盖陆域及部分海域的航磁数据编制的全国航磁系列图为基础, 以航磁反映的区域磁场和磁性基底起伏特征为依据, 汲取主流大地构造观的划分理念, 以板块构造理论及大陆动力学思想为指导, 以磁场反映的构造特征为切入点, 结合重力、遥感、地质资料对中国陆域构造单元进行划分。大地构造单元划分 4 个级别: 一级构造单元为陆块区和造山系, 共划分出 8 个; 二级构造单元为陆块、弧盆系和地块, 共划分出 32 个; 三级构造单元为盆地、拗陷带(区)和隆起带(区), 共划分出 85 个; 四级构造单元为隆起和拗陷, 共划分出 332 个。本划分方案旨在为油气地质构造背景研究及油气勘探提供一份地球物理资料。文中重点讨论了一、二级构造单元界线厘定的磁场依据及与前人划分存在的不同之处, 而三、四级构造单元完全依据磁场及磁性基底起伏情况进行划分, 并在盆地和拗陷区给出了深度信息, 这为油气勘探者提供了必要的技术支撑。同时, 借助丰富的航磁信息提示出一些地质构造方面难解现象, 供同行专家参考与讨论。

**关键词:** 航磁; 大地构造; 构造单元划分; 中国; 磁性基底深度

**中图分类号:** P544, P631.2<sup>2</sup>22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2018)04–0658–23

## Subdivision of tectonic units in China based on aeromagnetic data

XIONG Shengqing<sup>1,2</sup>, YANG Hai<sup>1,2</sup>, DING Yanyun<sup>1</sup>, LI Zhankui<sup>1</sup>

(1. *China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China*; 2. *Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** This research is based on the compiled aeromagnetic map of China that almost covers whole China's continent and part of China's sea areas since 2011 and the magnetic features and fluctuation of magnetic basement reflected by these maps. Learning from subdivision idea of mainstream tectonic views, guiding by theories of plate tectonics and continental dynamics, and taking the tectonic features reflected by magnetic field as key points, in combination with gravity, remote sensing and geological data, the authors divided the tectonic setting of China into four levels. Eight first-order tectonic units include continental block domains and orogenic systems; thirty-two second order tectonic units include continental blocks, arc-basin systems and land mass; eighty-five

收稿日期: 2017-07-12; 改回日期: 2017-11-17

基金项目: 中国地质调查局“中国陆域航磁特征及地质构造研究”项目(1212011087009)与国家 863 计划主题项目“航空地球物理遥感综合探测技术与解释系统研究”课题(2013AA063905)联合资助。

作者简介: 熊盛青, 男, 1963 年生, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事航空地球物理、遥感技术及其地学应用研究工作;

E-mail: xsq@agrs.cn。

third order tectonic units include basins, depression belts (areas), and uplift belts (areas); three hundred and thirty-two fourth order tectonic units include uplifts and depressions. This subdivision provides basic geophysical data for geological and tectonic background research and oil gas exploration. In this paper, the authors discussed the magnetic evidence for delineating boundaries of the first and second order tectonic units, and compared them with previous subdivision of tectonic units in China. The third and fourth order tectonic units were completely defined by the feature of magnetic field and fluctuation of magnetic basement. The magnetic basement depth of basins and depression areas are provided in this study, which provides the necessary technical support for oil and gas prospectors. Meanwhile, aeromagnetic anomalies show some special characteristics that are not consistent with observed geological and tectonic features, which provide raw data for discussion of tectonic features of China.

**Key words:** aeromagnetic; geotectonic; tectonic unit subdivision; China; magnetic basement depth

**About the first author:** XIONG Shengqing, male, born in 1963, senior engineer and supervisor of doctor candidates, mainly engages in application of aero geophysics, remote sensing technology in geosciences; Email: xsq@agrs.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011087009) and National High Technology Research and Development Program (No. 2013AA063905).

## 1 引言

中国陆域位于欧亚板块东南部,南邻印度板块和菲律宾板块,因板块相互作用以及受显生宙以来各期造山运动的影响,特别是从中生代至今被强烈改造后,造成现今独特而复杂的构造面貌。在经过多旋回演变发展历史后,不仅发育有古生代以来的各种造山系,还有古老的陆块区。一直以来,大地构造研究对现代资源评价和预测、油气和固体矿产勘探及成矿理论研究十分必要,因此,构造分区是我国地质学家比较重视的领域,各家用不同的方法、从不同角度探讨了中国大地构造发展规律,并以“多旋回构造学说”、“地质力学说”、“板块构造”等理论为指导思想,对中国大陆进行了一、二级大地构造单元划分并编制出相应图件(李四光,1973;黄汲清等,1980;李春昱等,1982;张文佑,1986;程裕淇,1994;任纪舜,1999;潘桂棠等,2009,2015;万天丰,2011)。同时,应用区域航磁资料研究大地构造的学者也不在少数,如曲国胜和王绳祖(1997)基于1989版的中国及其毗邻海域航空磁力异常图(刘寿彭,1989)对中国及其毗邻海域的航磁大地构造单元进行划分,并分别解释了7个一级构造单元和29个二级构造单元。朱英(2013)基于1987年编制完成的全国1:100万航磁图,对全国航磁特征进行了详细的描述,编制了中国大陆及沿海地区古大陆基础构造分区略图;杨华和梁月明(2013)基于2003年版中国及其毗邻海区1:500万航空磁力异常图,划分了中国地学断块构造。张家生等(1999)运用

航磁等资料对塔里木、扬子地体基底岩石的构造性质进行了解释,提出存在前寒武纪华北—塔南—扬子超陆块。还有大量学者运用航磁资料研究了青藏高原中西部、西昆仑、鄂尔多斯等地的构造特征及其板块碰撞作用(王有学等,2006;贺日政等,2007;王涛等,2007)。尽管这些成果对中国大地构造学研究起到了极大的促进作用,但对全国的航磁解释及大地构造分区均基于老的航磁编图资料。

随着最新版1:100万(成图比例尺1:250万)中国陆域航磁系列图(熊盛青等,2015a, b, c)问世,以及对相同比例尺的重力和遥感资料的深入分析,清晰呈现的中国陆块区、造山系、陆块、弧盆系、地块、拗陷带(区)、盆地和隆起带等诸多构造要素信息,为利用航磁资料厘定中国大地构造单元界线提供了深部视角。笔者基于新版中国陆域航磁系列图,结合重力、遥感、地质等基本特征及磁性基底起伏情况,首次对中国陆域进行4个级别的大地构造单元划分,一级构造单元为陆块区和造山系,共划分出8个,二级构造单元为陆块、弧盆系和地块,共划分出32个,三级构造单元为盆地、拗陷带(区)和隆起带(区),共划分出85个,四级构造单元为隆起和拗陷,共划分出332个。由于篇幅所限,文中对四级构造单元不展开论述,相关论述详见“中国陆域区域构造图(1:250万)”(熊盛青等,2015b)。值得提出的是,本文对塔里木陆块区的东界、华北陆块区的北界和西界、扬子陆块区的西北与东南界、天山—兴安造山系的南界提出了新的划法,并就塔里木陆块区与华北陆块区是否相连、阿拉善地块和敦煌地

块的构造归属提出了新的看法,与前人(张文佑 1984;程裕淇,1994;任纪舜等,1999;潘桂棠等,2009,2015;万天丰,2011)方案对比有较大差别,尤其对青藏地区的构造格架认识与前人(任纪舜等,1999;潘桂棠等,2015)完全不同。另外,笔者在划分三级构造单元的同时还给出盆地、坳陷区的分布范围和沉积地层厚度,并标注了等深度线和深度值,这为油气地质研究、油气勘探提供了重要依据。

## 2 航磁反映的中国大地构造特征

### 2.1 航磁研究大地构造的基本理论

一般认为,地磁场由基本磁场(地核磁场) $B_m$ ,岩石圈磁场 $B_L$ 和干扰磁场(外部磁场和电磁感应磁场) $B_o$ 三个部分组成(张昌达,2013)。基本磁场不是地质构造研究的主要对象,岩石圈磁场 $B_L$ 主要由岩石圈中地壳和上地幔顶部具有磁性的岩石或矿石(亚铁磁性铁矿等)所引起的局部磁场,是由磁化强度在水平方向和垂直方向上的变化产生的,这种长波长磁异常具有稳定或缓慢变化特点,磁场源大多发生在地壳内部。岩石圈磁场叠加在基本磁场之上,是地球物理勘探工作主要研究对象;而干扰磁场主要与来自地球外部的带电粒子的作用有关。对于地球物理勘探来讲,这种磁场的短期变化是干扰场,可以通过设立磁日变站进行磁日变观测来消除其影响。经过多年世界各大大国相继开展的系统航空磁测,以及获得的全球磁卫星图像表明,地球表面存在磁性层已经是不争的事实。

航磁测量作为透视地下深部地质构造信息的重要地球物理手段之一,与其他各种地球物理资料相比,不仅覆盖得最均匀,而且受地表地形干扰最小,穿透性强,这些特点使利用区域航磁资料研究地质构造成为可能。事实上,任何大规模的地质事件及其所反映出来的地质现象,总是与一定的地球深部背景相联系的,而地质现象又反映出一定的地球物理场特征。因为每一次的构造热事件所造成的结果,都会使原始地壳的磁性物质逐渐得到稀释,乃至接近消失。地球自古生代以来的每一次构造变动,实际上是很不彻底的,先期的残余构造很多被保留下来了。因此,通过对区域航磁异常特征分析,结合地质、古地磁等资料,可以在一定程度上研究地球尤其是地壳的构造演化特征。在大陆上,

磁异常显示出地壳、岩石圈地质和大地构造及其演化。在大洋区,磁异常的走向与等时线平行,因而揭示了洋壳随时间的演化,为板块构造、地壳与地幔的相互作用提供了重要依据。

一般在构造演化过程中,刚性块体的裂解、岩浆岩的演化都能导致块体磁性的变化,不同块体的磁性特征也会被改造和记录。航磁显示的磁异常强度、规模、形态、展布、走向、梯度等反映出浅部与深部磁异常体的空间分布、形状、产状等信息,亦即反映出在漫长的地质历史中经历的多期次复杂构造运动,而磁异常特征走向的改变一般表示磁性体分布的变化以及构造单元内部受到应力方向的变化。一般正岩石圈磁场对应磁性地壳厚度大的克拉通和稳定地块,是古老磁性结晶基底的反映;负岩石圈磁场对应造山带,地质学家还通过对卫星磁异常图和大地构造图对比分析后发现,许多前寒武纪地盾、克拉通、地台、盆地、造山带、活动带以及巨型铁矿等地质构造单元都有磁异常。区域航磁图既能反映当今地质构造信息,也能反映地球历次构造活动的形迹。

中国陆域经历了不同地质历史复杂的构造运动,现今大地构造特征是中国陆域的地壳与上地幔的结构、组成及其演化、运动的综合反映。并且由于沉积盖层通常无磁性或磁性较弱,磁场特征直接反映结晶基底情况,从而可以清晰解读中国不同大地构造单元演化至今的深部结构特征。如陆块区(地台)基底主要由太古宇变质岩系构成,这种性质的基底稳定性好、磁性强、构造变动小,沉积层是在稳定的环境下形成的,厚度大,岩浆活动弱,磁场反映为团块状和条块状正负磁场区,依据磁异常的走向可进一步确定陆块区的范围;造山系基底主要由中新元古界变质岩系构成,这种性质的基底稳定性差、磁性弱、构造变动强烈,岩浆活动剧烈,火山岩十分发育,沉积盖层厚度变化大,在磁场上反映为剧烈变化磁异常区,发育其中的地块构造相对稳定,沉积盖层厚,岩浆活动较弱,在磁场上多反映为块状、条带状磁异常。因此,判读和解释区域磁异常图,研究地壳磁性结构,可以了解地壳结构及成分。

### 2.2 航磁编图概况

航磁编图比例尺为1:100万,采用截至2011年中国地质调查局国土资源航空物探遥感中心(简称

航空物探遥感中心)和核工业遥感中心等单位的实测航磁数据,各区测量比例尺分别为1:100万~1:5000,共有568个测区数据。其中,高精度航磁测量测区143个,面积565.4万 $\text{km}^2$ ,中低精度航磁测量测区共有425个,面积1668.2 $\text{km}^2$ 。随着逐年测量工作的开展,在一些中、低精度测量区内又进行过多次测量,在拼接中国陆域航磁 $\Delta T$ 网格数据时,首选近年最新高精度1:5万、1:10万实测航磁数据,在中、低精度测量工作区内选择质量好、时间近、比例尺大、测量高度低的航磁数据参加计算,最终选择使用了409个测区的航磁数据,其中包括143个测区高精度航磁数据,266个中精度测量数据,覆盖面积为979.6万 $\text{km}^2$ ,编图还采用了部分海域的实测航磁数据。数据处理方法采用航空物探遥感中心自主研发的GeoProbe航空物探数据处理软件,网格数据量为4792行 $\times$ 4203列,网格间距为1 $\text{km}\times$ 1 $\text{km}$ ,成图比例尺为1:250万(“中国陆域航磁系列图”,熊盛青,2015c)。地理底图采用北京54坐标系,投影方式为兰伯特等角割圆锥投影,第一标准纬度 $25^\circ$ 、第二标准纬度 $47^\circ$ 、中央子午线经度 $105^\circ$ 、投影原点纬度 $18^\circ$ 。

由于岩石感应磁化受地球磁场的影响,磁化方向一般不垂直于地表,并且随位置的改变而变化,因此,磁异常的峰值一般不是位于磁源体的正上方,这样就增加了解释工作的难度,为了方便解释,往往对磁异常进行化极处理,得到化极磁力异常并依此异常特征进行解释。中国陆域航磁 $\Delta T$ 场数据涉及范围的南部跨度大,并且包括中国南部中低纬度地区,无法采用频率域常规化极方法,必须采用全变倾角磁方向转换方法,逐点变倾角及偏角,即“频率域偶层位变倾角磁方向转换方法”进行化极处理(熊盛青等,2013)。从化极处理结果(“中国陆域航磁 $\Delta T$ 化极等值线平面图”,熊盛青等,2015c)看,图面清晰地展示出中国大地构造与磁场间的直接对应关系。

### 2.3 中国陆域航磁分区特征

在航磁图研究中获得磁结构信息,从中提取地质构造信息是航磁图解释方法研究的核心。一般磁场分区结果就是构造分区结果。纵观中国陆域航磁图,可以看出存在8个迥然不同的磁场区。

天山—兴安磁场区主要以剧烈变化、条带状磁

异常为特征,多由互不相连、相间排列的正、负条带状异常组成,强度为 $-360\sim 600$  nT。异常走向由西向东呈北西向、东西向和北东向展布,其中发育有块状磁异常,这种磁场面貌反映出本区构造活动性大,基底主要由中新元古界和下古生界变质岩系构成,沉积层厚度分布不均,岩浆活动强烈,构造走向分别为北西向、东西向和北东向,磁异常区界线清晰。这是典型的造山系磁场特征。

塔里木磁场区以宽缓的块状、条块状为特征,磁异常走向塔北为近东西向,塔南为北东向。磁异常强度为 $-50\sim 500$  nT。航磁反映出本区构造十分稳定,基底主要由太古宇结晶岩系构成,沉积盖层厚度巨大,岩浆活动微弱,构造走向塔北为东西向,塔南为北东向。这是典型的陆块区磁场特征。

昆仑—祁连—秦岭磁场区主要由北西向线性磁异常带组成,仅在阿尔金地区磁异常走向为北东向,强度多为 $-100\sim 200$  nT。在柴达木盆地以区域性负磁场为主,仅在格尔木北部发育块状正异常,强度为 $-40\sim 60$  nT。航磁显示出本区构造变动大,基底主要由元古宇变质岩系构成,岩浆活动强烈,构造走向为北西向。磁异常区与周缘磁场区界线清晰。这是典型的造山系磁场特征。

华北磁场区主要以块状、条块状磁异常为特征,异常走向以北东向和北北东向为主,并有近东西向和南北向异常,强度为 $-250\sim 600$  nT。航磁反映出华北区构造变动小,基底主要由太古宇结晶岩系构成,沉积盖层厚度大,岩浆活动微弱,构造走向以北东向和北北东向为主,其中发育有东西向和南北向构造。这是陆块区磁场特征。

藏滇磁场区在平静低缓的背景场上叠加有近东西向和北西向线性异常带、团块状异常和串珠状异常。异常梯度陡,强度大,形成一系列近东西向、北西向的线性异常带。这种磁场面貌反映出本区构造活跃,断裂构造发育,岩浆活动剧烈,岩浆岩发育,基底主要由前奥陶系变质岩系构成。在可可西里—巴颜喀拉一带磁场由十分平静的正、负磁异常组成,强度为 $-40\sim 40$  nT,局部异常不发育,这反映出该区构造稳定,岩浆岩不发育。同时反映出区内构造走向为东西向和北西向。这是造山系磁场特征。

喜马拉雅磁场区磁场由低缓的负磁场组成,负背景场上叠加了北西西向的线性高磁异常带,局部

异常不很发育,构造走向为近东西向。基底主要由元古宇构成。这是造山系磁场特征。

扬子磁场区主要以条块状的正负磁异常为特征,异常宽缓且强度大。异常走向主要为北东向,并发育有北西向和南北向磁异常。正异常强度多为200~400 nT,负异常可达-300 nT,这反映出扬子区构造稳定,基底主要由新太古界—元古宇变质岩系构成,沉积盖层厚度大,岩浆活动较弱,构造走向以北东向为主,并发育有北西向和南北向构造。这是陆块区磁场特征。

华南磁场区主要以剧烈变化磁场为特征,磁异常走向多为北东向,强度为-100~300 nT,在东部沿海地区磁异常密集,强度大,这主要反映了中生代火山岩系的分布状况;在西部地区磁异常分布变得稀疏,强度变弱,这与侏罗—白垩纪花岗岩有关。那些条块状正异常主要是中酸性岩体的反映,区域性负异常则是前泥盆纪变质岩系的反映。这是造山系磁场特征。

### 3 构造单元划分的基本原则

#### 3.1 构造单元划分依据

##### 3.1.1 造山系划分的磁场依据

造山系是由造山带组成的,它发育在大陆边缘,因受大洋岩石圈俯冲、推挤,造成构造变动强烈,岩浆活动剧烈,由此形成一系列岛弧、火山弧,又残留有裂离地块,再经洋盆萎缩消减、弧—弧、弧—陆碰撞造山作用,从而使造山系构造面貌十分复杂。这种复杂的构造面貌被航磁反映出来,在磁场上多以剧烈和较剧烈变化磁场为特征,其中局部异常十分发育,它们多表现为线性异常带和杂乱变化的异常区,并发育有块状正、负磁场区。实际上,断裂构造往往成为造山系边界,其磁场面貌清晰,异常带连续性好,根据断裂构造圈定出造山系的分布范围。

##### 3.1.2 陆块区划分的磁场依据

陆块区也称之为准地台、克拉通,具有长期和复杂的演化历史,前新太古代为古老陆核形成阶段,该时期形成的硅铝质原始大陆壳地质体称为陆核,它是一个稳定的构造单元,具有稳定的基底和巨厚的盖层,后期构造变动不大,所以岩浆活动微弱。这种构造特征在磁场上以条块状、块状磁场为特征,局部异常不发育。它与造山系剧烈变化的磁

场面貌完全不同,它们之间界线分明,这就为圈定陆块区的分布范围提供了依据。根据磁异常的强度、形态以及走向可以判断陆块区的范围,并且依据陆块区不同演化阶段不同基底和盖层的岩石建造组合以及不同的构造面貌,所产生的磁场特征也会出现差异。通常前震旦纪、太古宙和古元古代以深变质岩系为主,磁性强,磁异常特征明显,反映为块状、条块状正磁异常。中新元古代以中浅变质岩系为主,磁性弱,在磁场上反映为宽缓的负磁异常,由此圈定陆块区范围。

##### 3.1.3 弧盆系和地块划分的磁场依据

弧盆系和地块是造山系的次一级构造单元。在造山系内根据磁异常变化特征,以线性异常带及串珠状异常以及夹持于其间的块状磁异常来区分弧盆系和地块,可进一步划分出弧盆系和地块。

发育在造山系内的弧盆系构造变动大,基底主要由弱磁性的中新元古界变质岩系构成,这种性质的基底不稳定,易发生形变,所以弧盆系内断裂发育,地层破碎、岩浆活动强烈、构造复杂,不同时代的侵入岩和火山岩大面积出露,往往在磁场上反映为剧烈变化的磁异常区;地块是残留于造山系内相对稳定的构造单元,基底主要由强磁性的新太古—古元古界结晶岩系构成,这种性质的基底稳定性好,构造变动小,岩浆活动多以火山岩地层为主,在磁场上多反映为块状、条带状磁场区。虽然剧烈变化的火山岩异常掩盖了结晶岩系引起的块状磁异常,但在磁场上将火山岩异常滤掉后,块状磁异常被突显出来,这与弧盆系引起的剧烈变化磁异常完全不同。依据磁场形态可圈定弧盆系和地块分布范围。

##### 3.1.4 陆块划分的磁场依据

陆块是陆块区内次一级构造单元。由于陆块区是由多个陆块拼贴而成,经过不同时期的演化,这些陆块有着不同的基底和盖层岩石组合,其构造走向和磁异常变化形态各不相同,这在磁场上会引起走向、面貌不同的磁场区,如华北陆块区由不同陆块组成,反映在磁场上,既有东西向磁场区,又有北东向和南北向磁场区等,这为划分陆块的分布范围提供了依据。

##### 3.1.5 盆地、拗陷带(区)、隆起带(区)划分的依据

盆地、拗陷带(区)、隆起带(区)的划分主要依据磁场特征及“中国陆域磁性基底深度图(1:250万)”

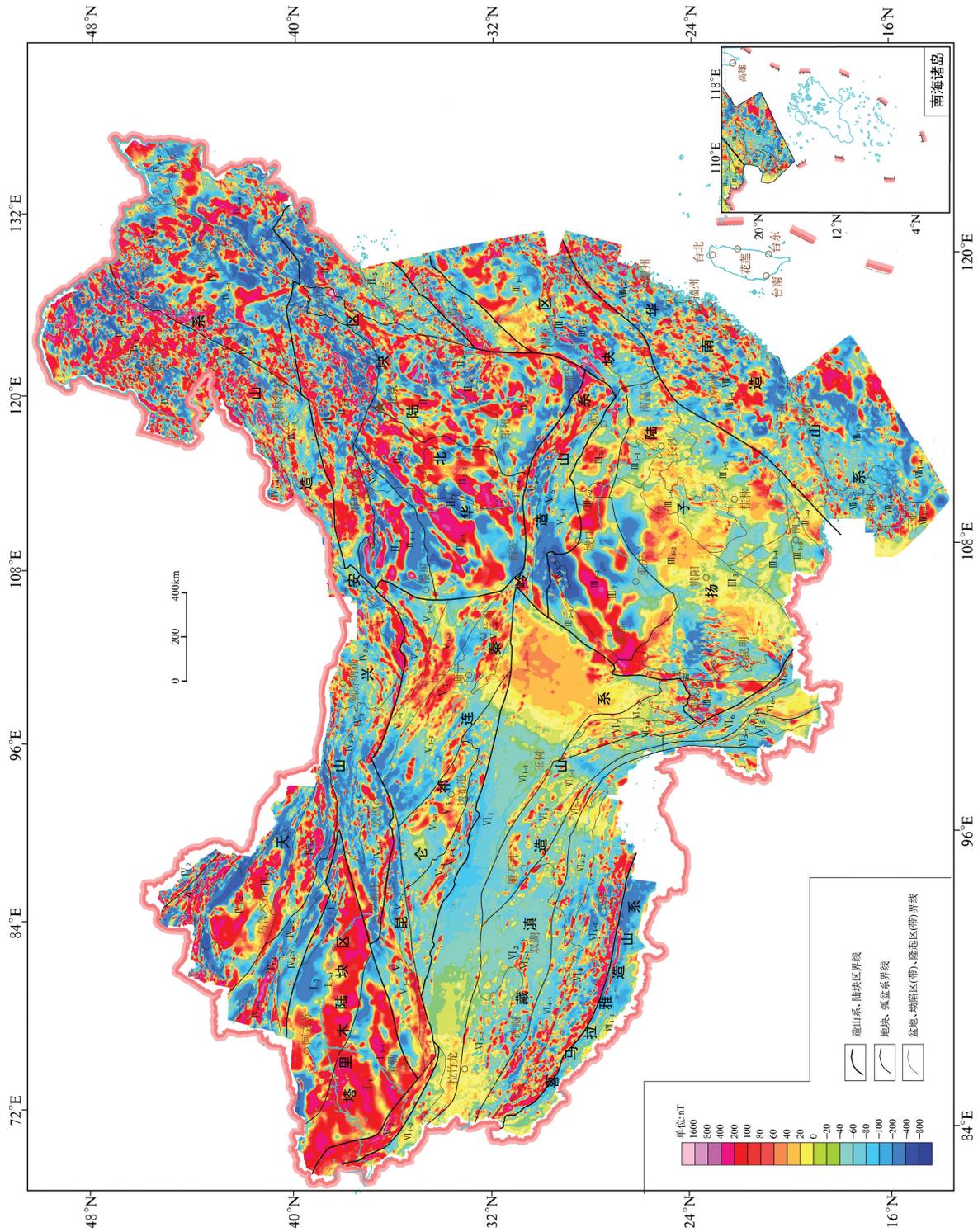


图1 中国陆域航磁划分大地构造单元在航磁化极图上的反映  
 Fig.1 Tectonic units of China revealed by aeromagnetic map with reduction to pole

审图号: GS(2014) 2904号

(熊盛青, 2015a)反映的磁性基底起伏形态, 沉积盖层发育特征, 并考虑断裂的控制作用。其边界以断裂或磁性基底等深线为界线。深度线小于0.5 km或变质基岩和岩体大面积出露地表的区域为隆起带(区)范围, 反之, 则为盆地或拗陷带(区)范围。同时, 在沉积盆地和拗陷区内对变质基底深度按等深度线标注了深度值。尽管通过航磁资料计算的深度值存在10%~20%的误差, 但仍满足构造航磁解释精度要求, 标注的深度值供参考使用。

### 3.1.6 构造单元划分的其他依据

在构造单元的划分过程中, 不仅仅考虑磁场上的划分依据, 还考虑地质、重力、遥感、磁性基底深度等方面的划分依据。如重力图上也有明显的构造分区特征, 尤其是在剩余重力异常图上, 构造分区特征更加明显。造山系和陆块区的重力异常形态特征和走向是不同的, 其中, 陆块区异常显得开阔、规模大, 而造山系异常相对窄小且形态复杂, 如秦祁昆造山系与塔里木陆块区重力场特征是完全不同的, 秦祁昆造山系在剩余重力异常图上反映为北西向重力异常带, 异常规模小、形态复杂, 而塔里木陆块区重力异常不十分发育, 异常开阔、规模相对大, 这些不同的区域场反映出不同的沉积作用、岩浆作用和变质作用。卫星遥感影像也反映出陆块区和造山系的特征是有区别的。陆块区的影像特征相对比较单一, 而造山系的影像特征多变且复杂。磁性体深度特征反映出各构造区基底深度差异, 为划分盆地、拗陷区、隆起区提供了依据。一般磁性基底埋深大(或盖层厚)的地区为拗陷带(区), 磁性基底埋深浅(或盖层薄)的地区为隆起带(区)。

## 3.2 航磁大地构造单元划分原则及命名

航磁划分大地构造单元以板块构造理论及大陆动力学思想为指导, 结合中国大陆区、造山系演化过程, 以航磁反映的区域磁场特征和磁性基底起伏情况为主要依据, 同时参考重力、卫星遥感影像及地质等资料。

按1:250万图面内容将大地构造单元划分到四级。一级构造单元为陆块区和造山系, 二级构造单元为陆块、弧盆系和地块, 三级构造单元为盆地、拗陷带(区)和隆起带(区), 四级构造单元为拗陷、隆起。

一级和二级构造单元的划分主要考虑到变质岩基底的时代、深断裂的控制作用、重磁场和遥感

影像特征, 并参考任纪舜(1999)和潘桂棠(2009, 2015)大地构造划分方案。若重磁场反映的一、二级界线与前人划分的不一致时, 则按重磁资料反映的界线划分。

三、四级构造单元的划分主要根据磁性基底起伏形态, 沉积盖层的发育情况, 同时考虑断裂的控制作用, 并以断裂或磁性基底等深线为边界。将盆地作为三级构造单元单独划出, 若盆地不完整时则按拗陷区划分。

在构造单元命名上, 一、二级构造单元名称参考任纪舜(1999)和潘桂棠(2009, 2015)命名, 三、四级构造单元名称按照基底起伏情况命名, 但盆地沿用已有名称。

## 4 航磁大地构造划分方案

按照1:250万比例尺航磁图, 中国航磁大地构造单元方案如下:

一级构造单元8个, 二级构造单元32个, 三级构造单元85个, 四级构造单元332个(文中不展开讨论)(图1, 图2, 图3, 表1)。

一级构造单元为陆块区和造山系, 全国共划分出3个陆块区: 塔里木陆块区、华北陆块区和扬子陆块区; 5个造山系: 天山—兴安造山系、昆仑—祁连—秦岭造山系、藏滇造山系、喜马拉雅造山系和海南造山系。

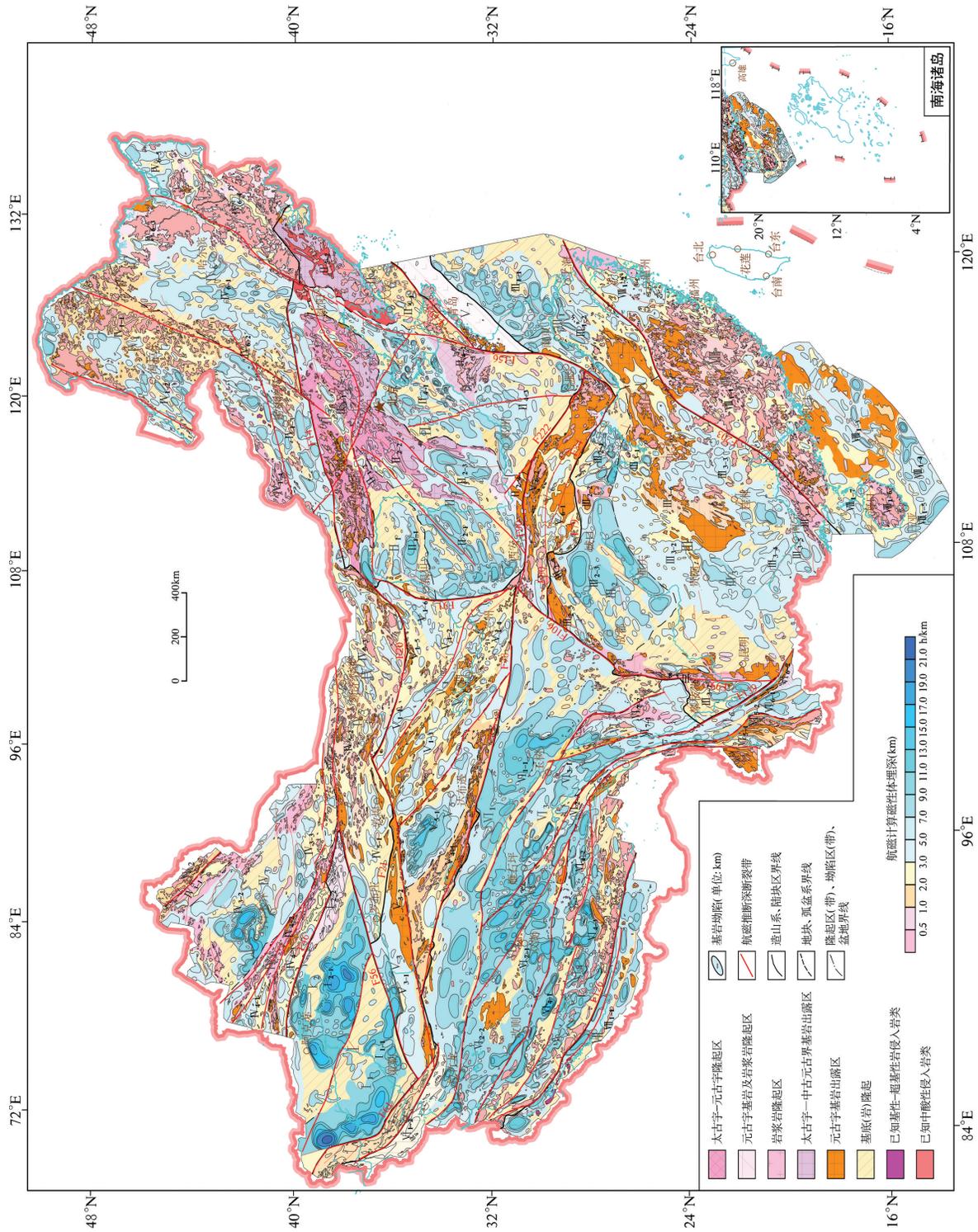
二级构造单元为陆块、弧盆系和地块。在造山系内划出弧盆系和地块, 在陆块区内划出陆块。

三级构造单元为盆地、拗陷带(区)、隆起带(区)。

值得说明的是, 尽管一级构造单元名称引用前人叫法, 但界线厘定存在多处差异, 如塔里木陆块区的东界、华北陆块区的北界和西界、扬子陆块区的西北与东南界、天山—兴安造山系的南界均与前人(程裕淇, 1994, 任纪舜, 1999, 潘桂棠, 2009, 2015)划分存在较大的差异, 并且在拗陷区给出了深度概念, 便于油气勘探工作者使用。

## 5 中国一、二级构造单元基本特征

中国陆域一至四级构造单元划分, 涉及一级构造单元8个, 二级构造单元32个, 三级构造单元85个, 四级构造单元为332个。本节重点探讨中国一、



审图号: GS(2014)2904号

图2 中国陆域航磁划分大地构造简图  
Fig.2 The subdivision of tectonic units in China revealed by aeromagnetic data

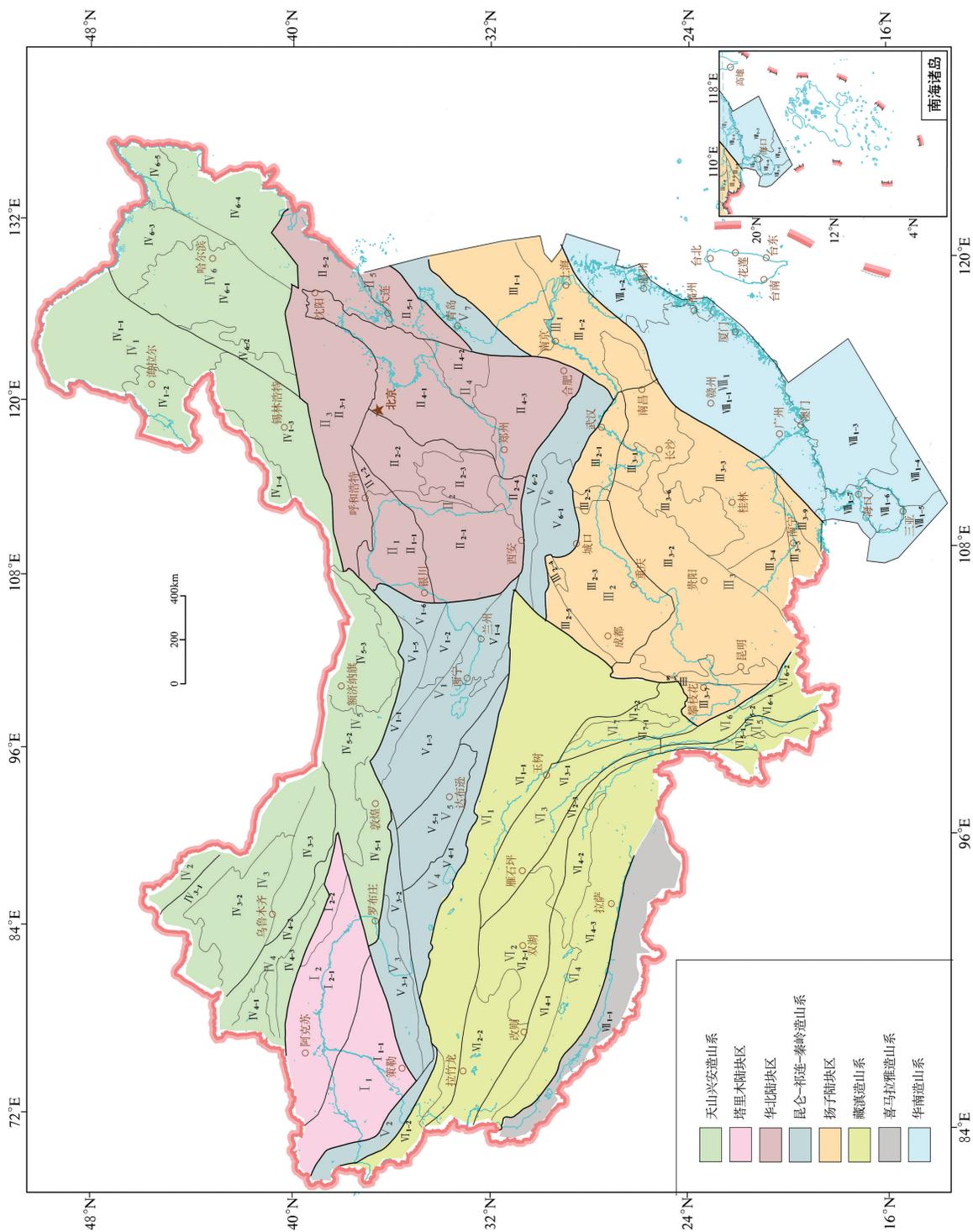


图3 中国陆域大地构造单元简图

Fig.3 Schematic map of tectonic units in China revealed by aeromagnetic data

审图号: GSI(2014)2904号

表1 中国航磁大地构造单元划分  
Table 1 Tectonic units of China revealed by aeromagnetic data

一级构造单元	二级构造单元	三级构造单元	
		名称及编号	航磁计算盆地或拗陷区沉积层厚度/km
I 塔里木陆块区	I <sub>1</sub> 塔南陆块	I <sub>1-1</sub> 塔南拗陷区	和田—策勒<1, 其余 7~21
	I <sub>2</sub> 塔北陆块	I <sub>2-1</sub> 塔北拗陷区	2~18
		I <sub>2-2</sub> 库鲁克塔格隆起带	
II 华北陆块区	II <sub>1</sub> 包头—银川陆块	II <sub>1-1</sub> 北鄂尔多斯拗陷区	伊盟、贺兰山<3, 其余 5~11
		II <sub>1-2</sub> 集宁隆起带	
	II <sub>2</sub> 太行—吕梁陆块	II <sub>2-1</sub> 南鄂尔多斯拗陷区	2~11
		II <sub>2-2</sub> 五台隆起带	大同 2~5
		II <sub>2-3</sub> 沁水盆地	临汾<3, 其余 3~9
		II <sub>2-4</sub> 三门峡隆起带	
	II <sub>3</sub> 阴山—冀北陆块	II <sub>3-1</sub> 阴山—燕山隆起带	2~7
	II <sub>4</sub> 河淮陆块	II <sub>4-1</sub> 渤海湾盆地	埕宁、陈庄、葫芦岛<3, 其余 3~11
		II <sub>4-2</sub> 鲁西隆起区	涌泉 2
		II <sub>4-3</sub> 华北南部盆地	0.5~9
II <sub>5</sub> 胶辽陆块	II <sub>5-1</sub> 北黄海盆地	0.5~7	
	II <sub>5-2</sub> 辽东隆起带	1~3	
III 扬子陆块区	III <sub>1</sub> 下扬子陆块	III <sub>1-1</sub> 南黄海—苏北盆地	1~11
		III <sub>1-2</sub> 南京拗陷区	1~9
		III <sub>1-3</sub> 黄山隆起区	
	III <sub>2</sub> 四川—江汉陆块	III <sub>2-1</sub> 江汉盆地	天门<1, 其余 1~13
		III <sub>2-2</sub> 黄陵隆起区	
		III <sub>2-3</sub> 四川盆地	4~11
		III <sub>2-4</sub> 汉南隆起带	1~1.5
		III <sub>2-5</sub> 龙门山隆起带	3~7
	III <sub>3</sub> 滇黔桂陆块	III <sub>3-1</sub> 洞庭湖盆地	太阳山、石首<1, 其余 3~9
		III <sub>3-2</sub> 江南隆起北缘拗陷带	1~7
		III <sub>3-3</sub> 江南隆起南缘拗陷带	1~9
		III <sub>3-4</sub> 百色拗陷区	3~7
		III <sub>3-5</sub> 十万大山盆地	3~7
III <sub>3-6</sub> 雪峰隆起带		2~3	
III <sub>3-7</sub> 楚雄盆地		3~9	
	III <sub>3-8</sub> 康滇隆起带		
	III <sub>3-9</sub> 钦州隆起带	2~5	
IV 天山—兴安造山系	IV <sub>1</sub> 兴安弧盆系	IV <sub>1-1</sub> 大兴安岭隆起带	2~9
		IV <sub>1-2</sub> 海拉尔盆地	杭乌拉、嵯岗、海拉尔、巴彦山<1, 其余 3~9
		IV <sub>1-3</sub> 二连盆地	巴音乌兰、查干诺尔<0.8, 其余 3~9
		IV <sub>1-4</sub> 巴音宝力格隆起区	
	IV <sub>2</sub> 阿尔泰弧盆系		
	IV <sub>3</sub> 准噶尔—吐哈地块	IV <sub>3-1</sub> 准噶尔盆地北缘隆起区	1~7
		IV <sub>3-2</sub> 准噶尔盆地	木垒北部<2, 其余 2~15
		IV <sub>3-3</sub> 吐哈盆地	博格达山、南湖、烟墩<2, 其余 2~9
	IV <sub>4</sub> 伊宁—中天山地块	IV <sub>4-1</sub> 伊宁盆地	2~7
		IV <sub>4-2</sub> 那拉提隆起带	3~5
		IV <sub>4-3</sub> 巴音布鲁克拗陷带	2~5
	IV <sub>5</sub> 北山地块	IV <sub>5-1</sub> 敦煌盆地	安西<1, 其余 1~7
		IV <sub>5-2</sub> 北山—狼山隆起区	1~5
		IV <sub>5-3</sub> 银根—额济纳旗盆地	巴彦特拉、苏怀图、湖西新村、咸水、巴音毛道<1, 其余 1~5

续表1

一级构造单元	二级构造单元	三级构造单元	
		名称及编号	航磁计算盆地或拗陷区沉积层厚度/km
IV 天山—兴安造山系	IV <sub>6</sub> 吉黑地块	IV <sub>6.1</sub> 松辽盆地	龙江<0.8,其余 1.5~9
		IV <sub>6.2</sub> 乌兰哈达隆起带	2~5
		IV <sub>6.3</sub> 小兴安岭隆起区	2~5
		IV <sub>6.4</sub> 张广才岭隆起区	1~5
		IV <sub>6.5</sub> 三江盆地	富锦<2, 其余 3~9
V 昆仑—祁连—秦岭造山系	V <sub>1</sub> 祁连弧盆系	V <sub>1.1</sub> 酒泉—民乐盆地	3~7
		V <sub>1.2</sub> 武威盆地	永昌—甘塘、海城<2, 其余 2~5
		V <sub>1.3</sub> 祁连山隆起带	2~7
		V <sub>1.4</sub> 陇西盆地	循化<2, 其余 2~5
		V <sub>1.5</sub> 潮水盆地	金昌、牙抓山<1, 民勤 2~3
		V <sub>1.6</sub> 巴彦浩特盆地	1~7
	V <sub>2</sub> 西昆仑弧盆系		
	V <sub>3</sub> 阿尔金弧盆系	V <sub>3.1</sub> 且末拗陷带	2~13
		V <sub>3.2</sub> 喀什塔什—阿尔金隆起带	
	V <sub>4</sub> 东昆仑弧盆系	V <sub>4.1</sub> 布尔汗布达隆起带	2~3
	V <sub>5</sub> 柴达木地块	V <sub>5.1</sub> 柴达木盆地	大柴旦<1, 其余 2~16
	V <sub>6</sub> 秦岭一大别地块	V <sub>6.1</sub> 南秦岭拗陷带	1~5
		V <sub>6.2</sub> 大别隆起带	
V <sub>7</sub> 苏鲁地块			
VI 藏滇造山系	VI <sub>1</sub> 松潘—甘孜地块	VI <sub>1.1</sub> 可可西里—松潘拗陷区	0.5~13
		VI <sub>1.2</sub> 甜水海隆起带	
	VI <sub>2</sub> 羌塘地块	VI <sub>2.1</sub> 羌塘盆地	双湖<1, 其余 5~13
		VI <sub>2.2</sub> 龙木错—丁沟拗陷区	戈木日<3, 多玛 3~13
		VI <sub>2.3</sub> 巴青—丁青拗陷带	类乌齐、永曲<2, 其余 2~9
	VI <sub>3</sub> 昌都地块	VI <sub>3.1</sub> 雁石坪—昌都盆地	2~13
	VI <sub>4</sub> 冈底斯—念青唐古拉地块	VI <sub>4.1</sub> 措勤盆地	3~15
		VI <sub>4.2</sub> 比如盆地	班戈<1, 那由 5~11
		VI <sub>4.3</sub> 隆格—拉萨拗陷带	冈底斯—波密<1, 隆格—申扎 5~15
	VI <sub>5</sub> 中缅—马苏地块	VI <sub>5.1</sub> 镇康拗陷带	1~5
		VI <sub>5.2</sub> 贡山—临沧隆起带	
	VI <sub>6</sub> 兰坪—思茅地块	VI <sub>6.1</sub> 思茅盆地	2~9
		VI <sub>6.2</sub> 哀牢山隆起带	
	VI <sub>7</sub> 理塘弧盆系	VI <sub>7.1</sub> 巴塘—木里拗陷区	江达—巴塘、木里<3, 其余 3~11
		VI <sub>7.2</sub> 理塘隆起带	
VII 喜马拉雅造山系	VII <sub>1</sub> 喜马拉雅地块	VII <sub>1.1</sub> 札达—定日拗陷区	普兰—康马、聂拉木<3, 其余 5~11
VIII 华南造山系	VIII <sub>1</sub> 华夏地块	VII <sub>1.1</sub> 武夷—云开隆起带	1~3
		VII <sub>1.2</sub> 浙闽拗陷带	0.5~3
		VII <sub>1.3</sub> 珠江口盆地	0.5~9
		VII <sub>1.4</sub> 琼东南盆地	2~9
		VII <sub>1.5</sub> 莺歌海盆地	2~9
		VII <sub>1.6</sub> 海南岛隆起带	
		VII <sub>1.7</sub> 北部湾盆地	0.5~7

二级航磁大地构造单元划分情况。从西向东,以8个一级构造单元为切入点,简述二级构造单元磁场特征及地质内涵,并结合磁性基底深度特点探讨构造单元基本特征。

### 5.1 塔里木陆块区

位于新疆的塔克拉玛干沙漠覆盖区。其北以南天山断裂( $F_{46}$ )为界,南以西昆仑北缘断裂( $F_{61}$ )为界,东以策勒—尾亚断裂( $F_{56}$ )为界。在磁场图上以较强的磁异常变化幅度与阿尔金、北山、天山构造区磁场特征相区别(图1);在剩余重力场上反映为宽缓的重力异常分布区。关于塔里木陆块区东部边界与华北陆块是否相连接一直存在争议。潘桂棠等(2015)将敦煌地块和阿拉善地块划归塔里木陆块区,二者衔接了塔里木陆块区和华北陆块区两大构造单元。朱英(1989)通过航磁异常认为塔里木地台的东部边界应划在罗布泊—尾亚一带,两侧磁场面貌有较大差别。此次通过1:100万全国航磁编图认为,塔里木陆块区的东界应划在策勒、安迪尔、托尕木一线,即以策勒—尾亚断裂( $F_{56}$ )为界(两侧的磁场、重力场面貌完全不同),而不是沿阿尔金山山根或车儿臣河一线。依据磁场特征,此次将前人所谓的敦煌地块划归天山—兴安造山系,将阿拉善地块划归昆仑—祁连—秦岭造山系。磁场同时显示出塔里木陆块区未向东延伸,也不与华北陆块区相连接,这是与前人(程裕淇,1994,任纪舜等,1999,潘桂棠等,2015)划法的最大不同。依据磁场特征,塔里木陆块区由2个前寒武纪陆块拼合而成,即塔南陆块和塔北陆块。

#### 5.1.1 塔南陆块

位于塔里木陆块区南部地区。以北东走向升高的正磁异常带为特征,磁异常强度 $-50\sim 300$  nT,应是太古宇结晶岩系的反映,其向南延伸与西昆仑北西向分布的正磁异常带相交。在其南部的铁力克已见新太古代喀拉喀什岩群结晶杂岩出露,并与升高的正磁异常带对应,可见新太古界结晶岩系构成了塔南陆块的基底,埋藏深度为 $9000\sim 21000$  m。沉积盖层主要为新生界陆相碎屑岩,并发育有古生界和中生界,其中缺失三叠系,在坳陷内可能存在一定厚度的元古宙地层。塔南坳陷内沉积盖层厚 $7000\sim 21000$  m,隆起上厚 $7000\sim 9000$  m,属低隆起性质。

#### 5.1.2 塔北陆块

位于塔里木盆地北部。以近东西向展布的正、负磁场为背景,磁异常强度 $-150\sim 500$  nT。在库鲁克塔格出露了新太古界达格拉格布拉克群、古元古界兴地塔格群及中新元古界长城系—青白口系变质岩系。其上不整合覆盖有震旦系冰碛岩组碎屑岩,并见有寒武—奥陶系和志留—泥盆系分布。古生代沉积以陆表海为主,沉积盖层厚度较大。从磁场特征分析,塔北南部升高正磁异常应是中新太古界强磁性结晶岩系的反映,可能与达格拉格布拉克群相当,负磁场背景主要是元古宇浅变质岩系弱磁岩石的反映。航磁反映出沉积盖层厚 $2000\sim 18000$  m。据地震勘探,陆块震旦系和古生界十分发育,厚度为 $8000\sim 14000$  m,中新界保存全,厚度为 $2000\sim 3000$  m。这显示出古生代以来为一长期稳定的坳陷区。塔北坳陷区沉积盖层在坳陷内厚 $7000\sim 18000$  m,隆起上厚 $3000\sim 5000$  m,局部为 $7000\sim 9000$  m。

### 5.2 华北陆块区

位于中国秦岭—大别山以北地区,其北以白云鄂博—西拉木伦断裂( $F_{14}$ )为界,东以鄂尔多斯西缘断裂( $F_{91}$ )为界,西以郟庐断裂( $F_{156}$ )南段及诸城—海州断裂( $F_{195}$ )为界,南以秦岭北缘断裂( $F_{90}$ )和三门峡—霍山断裂( $F_{222}$ )为界(图2)。在磁场上为十分醒目的块状升高变化异常区。在剩余重力场上主要反映为宽阔的重力异常分布带区。

就华北陆块区北界而言,黄汲清等(1980)、任纪舜等(1999)大致划在和龙—桦甸—四平南—赤峰—化德—白云鄂博—狼山—巴彦诺日公—金塔—一线。潘桂棠等(2015)大致划在和龙—桦甸—四平南—赤峰—化德—白云鄂博—一线。此次通过航磁图发现,前人划分的北界中段(即四平南—赤峰—化德—白云鄂博—一线)应向北推移约 $80$  km,即沿白云鄂博—镶黄旗北—克什克腾旗—西拉木伦河—一线。因为沿这一线有一条线性高磁异常带,以该磁异常带为界,两侧的磁异常面貌完全不同,南侧反映为正负变化的磁异常区,异常走向多为北东向,强度为 $-200\sim 500$  nT,其异常走向和形态特征与华北陆块区相一致,北侧磁异常走向为东西向和北东向,强度 $-100\sim 100$  nT,磁异常形态特征、强度、走向与北山—锡林浩特磁场面貌相同,应属兴安弧盆

系磁异常特征;在布格重力图和剩余重力异常图上也有相同反映。重磁场特征揭示沿线两侧分属不同构造单元,且基底性质、盖层发育程度、构造变动方式和岩浆活动特点等均有差异。因此认为,沿这一线存在一条分割性极强的深断裂,即白云鄂博—西拉木伦深断裂带( $F_{14}$ ),它构成了华北陆块区北部西段界线。故华北陆块区北界应为和龙—桦甸—四平南—西拉木伦河—克什克腾旗—镶黄旗北—白云鄂博一线,其北界止于白云鄂博西部的狼山一带。

对华北陆块区西界的划分也有较大争议,有多种划法。如程裕洪(1994)认为它与塔里木陆块区相连,并包含河西走廊、阿拉善地区;任纪舜等(1999)也将河西走廊及阿拉善地区划归华北陆块区范围内。本次根据重磁场特征,将华北陆块区西界划在乌拉特后旗东—阿拉善左旗—同心—宝鸡一线,这一划法与潘桂棠等(2009, 2015)、万天丰(2011)认识是一致的。从航磁图可见,河西走廊及阿拉善地区的磁异常走向为北西向,强度为 $-100\sim 80$  nT,其形态特征与祁连山地区的磁异常特征相一致;而华北陆块区反映的磁异常走向多为北东向,规模较大,梯度较缓,强度为 $-200\sim 400$  nT。可见,以乌拉特后旗东—阿拉善左旗—同心—宝鸡一线为界,两侧的磁场面貌是完全不同的,前者是造山系磁场特征,后者是陆块区特征;剩余重力异常也有相同反映,说明河西走廊及阿拉善地区在构造上应属祁连弧盆地。

综合上述,笔者认为华北陆块区北界应划在和龙—桦甸—四平南—西拉木伦河—克什克腾旗—镶黄旗北—白云鄂博一线,西界应划在乌拉特后旗东—阿拉善左旗—同心—宝鸡一线。航磁资料还反映出华北陆块区由包头—银川陆块、太行山—吕梁山陆块、阴山—冀北陆块、河淮陆块和胶辽陆块5个构造走向不同的陆块拼贴而成。

#### 5.2.1 包头—银川陆块

位于鄂尔多斯盆地北部银川、东胜地区,包括鄂尔多斯盆地北部。磁场以正负变化的条带状、块状磁异常为特征,异常走向为近东西向,正负磁异常相间排列。强度 $-250\sim 500$  nT。陆块内大部分地区被第四系覆盖,仅在西缘和北缘广泛出露中新太古界乌拉山岩群、集宁岩群、千里山群、贺兰山岩群

和古元古界色尔腾山群。经对比,在集宁—包头一带的乌拉山岩群、集宁岩群与正异常对应较好,这套地层具强磁性,那些宽缓的正异常应是乌拉山岩群和集宁岩群强磁性基岩的反映。负磁场则是弱磁性的千里山群、贺兰山岩群和色尔腾山群的反映。这两套地层构成了陆块的基底,构造走向主要为东西向。本区自古生代及中生代以来属长期沉积区,古生界和中生界很发育,其中古生界缺失了上奥陶统至下石炭统,这套地层主要分布于北鄂尔多斯拗陷区。在拗陷内盖层沉积厚 $5000\sim 11000$  m,隆起上下古生界缺失,上古生界和中生界分布不均,厚度大都小于 $3000$  m,仅在低隆上仍有 $5000$  m厚的盖层沉积。

#### 5.2.2 太行山—吕梁山陆块

位于西安、太原地区,包括了鄂尔多斯盆地南部。磁场以北东向展布的正负磁异常带为特征,正异常为主,负异常范围较窄,强度 $-250\sim 400$  nT。在吕梁山、太行山、伏牛山地区出露有中新太古界阜平岩群、五台群、滹沱群、赞皇群、登封群变质岩系,其中,阜平岩群、赞皇群、登封群具强磁性,它们引起了 $50\sim 300$  nT的磁异常。新太古界五台群和古元古界滹沱群变质岩系磁性弱,出露区与负异常相对应,它们能引起 $-50\sim -250$  nT的磁异常。可见陆块的基底由中新太古界阜平群、赞皇群、登封群、五台群和古元古界滹沱群构成。陆块沉积盖层为古生界和中生界,在山西中南部、冀西南、豫北、沁水盆地形成了陆表碳酸盐台地。汾渭裂谷为新生代张剪性裂谷盆地,新生界厚可达 $7000$  m;在新生代伴随有3次玄武岩喷溢。沉积盖层在南鄂尔多斯拗陷区厚 $5000\sim 11000$  m,隆起上厚度小于 $5000$  m,属于低隆起,沁水盆地在拗陷内厚 $3000\sim 9000$  m,隆起上厚 $3000$  m左右。

#### 5.2.3 阴山—冀北陆块

位于华北陆块区北部。磁场以剧烈变化的磁异常为特征,异常呈东西向和北东向,正负异常交替分布,强度 $-200\sim 400$  nT。异常对应较老的地层有中新太古界乌拉山岩群、集宁岩群、迁西岩群等,其中的角闪片麻岩、花岗角闪片麻岩、花岗片麻岩和磁铁石英岩具强磁性,可引起区域性正异常,而混合岩、混合花岗岩、石英岩、石英片岩为弱磁性,它们是引起区域性负异常的主因。那些叠加在区域场之上的局

部磁异常是侏罗纪中酸性火山岩系和晚古生代、中生代中酸性岩体的反映。陆块的基底主要由乌拉山岩群、集宁岩群、迁西岩群等构成,构造走向为东西向和北东向。陆块上沉积盖层大多缺失,仅在一些山间拗陷仍有2000~7000 m厚的盖层沉积,其中多被中生界充填,古生界厚度不大。

#### 5.2.4 河淮陆块

位于河淮地区。磁场以团块状磁异常为特征,异常走向多变,为近南北向、北东向和东西向,异常强度-250~400 nT。陆块大部分被第四系覆盖,仅在鲁西、淮北、霍邱地区分别见有中新太古界泰山岩群、五河群、霍邱岩群出露。泰山岩群具中等至强磁性,出露区与正异常相对应。五河群、霍邱岩群也与正异常对比较好,说明区内的正异常是由上述强磁性变质岩系引起的。中新太古界变质岩系中的均质混合岩、花岗片麻岩、混合花岗岩磁性很弱,当它们分布有一定面积时可引起负异常。陆块的基底主要由中新太古界泰山岩群、五河群、霍邱岩群构成,构造走向为近南北向、北东向和东西向。陆块覆盖有华北陆块型全套沉积盖层,厚2000~11000 m,但盖层分布不均匀,厚度变化较大。中新元古界和下古生界主要为一套碳酸盐岩;石炭—二叠系则主要是薄层灰岩、煤系及砂泥;中生界主要为含火山岩的陆相碎屑岩,新生界则为砂泥岩互层。渤海湾盆地拗陷内厚5000~11000 m,隆起上厚2000~3000 m;华北南部盆地拗陷内厚5000~9000 m,隆起上厚度小于3000 m。

#### 5.2.5 胶辽陆块

位于辽东和胶东半岛。磁场以剧烈变化的磁异常为特征,异常呈北东向,正负异常交替分布,强度-150~400 nT。基底由新太古界鞍山群、龙岗群、胶东群和古元古界辽河群等变质杂岩组成。异常对应的新太古界鞍山群、龙岗群大多具强磁性,可引起区域性正异常,古元古界变质岩系磁性较弱,反映为负磁场背景。那些叠加在区域场之上的局部磁异常主要是中生代中酸性岩体的反映。依据磁场特征分析,新太古界鞍山群的构造线主要是近东西向,而古元古界辽河群构造线走向主要为北东向。古生界出露了中寒武—奥陶系、石炭—二叠系,具陆表海特征,厚度不大,岩相稳定,可与华北地层区对比。中生界为陆相碎屑岩夹火山岩沉

积,这套地层主要发育于北黄海盆地,厚1000~3000 m,局部可达5000~7000 m。

#### 5.3 扬子陆块区

位于秦岭—大别山以南,东南沿海以西,青藏高原以东地区,磁场主要以条块状正负磁异常为特征,异常宽缓,但强度大,多为-300~400 nT;剩余重力场以宽缓的重力异常为特征。笔者根据磁场和重力场特征,对扬子陆块区的西北界和东南界的西南段提出了新的认识。就其西北界而言,原认为陆块区的西北界为龙门山断裂,现认为其西界应划在武都、理县、康定一线,即以武都—康定断裂( $F_{106}$ )为界,陆块区的西界向西北推移了约90 km,将龙门山构造带划归扬子陆块区。这从重、磁场图上看,龙门山地区的重磁异常形态与松潘—甘孜地块重磁异常特征完全不同,而与扬子陆块区的重磁场特征相似。磁场反映龙门山地区为正负变化的磁异常区,异常强度很大,为-200~300 nT,异常走向为北东向,与扬子区磁异常走向和强度一致。而松潘—甘孜地区航磁反映为平缓变化的正负异常区,异常强度-40~40 nT(图1)。且龙门山断裂不是深断裂,它是叠加在北东向构造之上的推覆带前缘断裂。潘桂棠等(2015)也将龙门山构造区划归扬子陆块区;就其东南界线而言,其东南与华南造山系西南段的界线应划在临川(抚州)、汝城、北流一线(此段界线有的划在茶陵、郴州一线,有的划在江南隆起南缘一带),即以北海—江山—绍兴断裂( $F_{203}$ )西南段为界。在磁场上,沿北流—临川—江山—绍兴一线出现不同磁场区界线和线性密集带,这是北海—江山—绍兴断裂带的反映,亦是扬子陆块与华南活动带对接带的位置。在断裂带两侧,重磁场面貌完全不同。西北侧为相对平静变化的磁场区,区域磁场主要显示为块状特点,磁场强度为-50~100 nT,磁异常走向为北东向、北西向和南北向。而在断裂东南侧则为剧烈变化的磁异常区,磁异常走向主要为北东向,磁异常强度为-100~300 nT,显示出岩浆岩的磁异常特征;在布格重力异常图上显示出重力梯级带,同时构成了不同重力场界线,两侧的重力异常走向是不同的。东南侧重力异常走向为北东向,而西北侧重力异常走向多变。沿线也是一条重要的构造—岩浆岩分界线。界线东南的华南区,在中生代岩浆的侵入和喷发活动相对强烈,形成了大

面积分布的中酸性侵入岩和火山岩系,而西北侧岩浆岩相对不很发育,以岩浆侵入活动为主,火山岩不发育。在临川—博白东南侧元古宙地层大面积出露,古生代地层保存不全,断裂和地层走向主要为北东向,而西北侧古生代地层发育,保存较好,断裂和地层走向多变,为北东向、南北向。可见北海—江山—绍兴断裂带构成了扬子陆块区的东南界线。这条界线也与万天丰(2011)划分的界线比较接近。潘桂棠等(2015)也将扬子陆块区西南界线大致划在这一线。从磁场特征分析,陆块区由基底性质不同的下扬子陆块、四川—江汉古陆块和滇黔桂陆块3个陆块拼贴而成。

### 5.3.1 下扬子陆块

位于苏浙皖地区。从磁场特征分析,以长江为界,苏南地区以正负变化磁异常为特征,这些北东向的磁异常叠加在低缓的背景磁场上,呈正负相间的磁异常条带;苏北的南黄海—苏北盆地为块状和条带状正负磁异常,异常梯度较缓,强度 $-200\sim 300$  nT。这种磁场面貌反映出苏北和苏南基底性质和构造面貌是有差别的。

南黄海—苏北盆地基底主要由新太古—古元古界胶南群(或胸山系)构成,上覆中新元古界海州群,基底埋藏深度多为 $4000\sim 11000$  m。震旦及古生代显示为稳定陆表海环境,中新生界厚度大,为 $2000\sim 7000$  m。沿如皋—南京一线显示为一条负磁异常带,这是一条断面南倾的断裂带的反映,其南部隆起向北逆冲推覆在黄海—苏北盆地之上。

苏南的景德镇地区广泛出露中新元古界浅变质岩系,由于其磁性很弱,因此,在磁场上主要反映为平缓的负磁场特征。在江山—绍兴一带磁场显示为变化和升高特征,沿这一带发育有新元古界上溪群等变质岩系。在金山地区、宁镇山脉东段钻井在震旦系之下见到角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩(同位素年龄 $1123\sim 1771$  Ma),在奉贤、嘉定等地钻井见到与浙西相同的震旦—奥陶系不整合在深、浅变质不同的基底杂岩之上。上述表明,这些地区的基底性质与景德镇出露区相同。陆块的盖层发育良好,由海相中古生界和陆相中新生界构成。沉积盖层在南黄海—苏北盆地的拗陷中厚 $5000\sim 11000$  m,隆起上厚 $1000\sim 3000$  m。在南京拗陷区的拗陷内厚 $3000\sim 9000$  m,隆起上厚 $1000\sim 2000$  m。

### 5.3.2 四川—江汉古陆块

位于四川盆地和江汉盆地。磁场以条块状正负磁异常为特征,异常宽缓,强度 $-300\sim 400$  nT。四川盆地异常走向主要为北东向,江汉盆地为北西向。四川盆地在早期就被解释为一个由古元古界康定岩群构成的刚硬地块。从磁场特征分析,江汉地区同样存在一个古老陆核,这个陆核主要由古元古界崆岭群深变质岩系构成,其上还不整合覆盖了厚度较大的中新元古界西乡群等变质岩系。负异常则是弱磁性的中新元古界会理群、昆阳群、西乡群等变质岩系的反映。据分析认为,四川—江汉古陆块可能是从华北陆块区分裂出来而成为元古宇洋盆中的古陆核(杨华等,2013)。这种磁场面貌反映出其深层为一菱形的结晶基底岩块,它在构造上十分稳定,其上覆盖有厚度很大的盖层沉积,形成了四川盆地和江汉盆地。盖层沉积发育,自震旦纪至中生代地层均有发育,但在不同地区分布是不均匀的,如四川盆地缺失了新生代沉积,而在江汉盆地等就很发育。震旦系、古生界和三叠系主要为陆表海沉积,之后的地层为陆相沉积。沉积盖层在江汉盆地厚 $2000\sim 13000$  m,拗陷内沉积厚 $5000\sim 13000$  m,隆起上厚 $1000\sim 3000$  m。四川盆地厚 $4000\sim 11000$  m,拗陷内厚 $7000\sim 11000$  m,隆起上仍有 $3000\sim 6000$  m的盖层沉积。

### 5.3.3 滇黔桂陆块

位于滇黔桂地区。磁场以平静低缓、走向北东向为特征,强度 $-50\sim 100$  nT。其中在康滇地区发育有南北向磁异常带,它们叠加在低缓磁场之上。基底主要由中新元古界会理群、昆阳群、四堡群、梵净山群、冷家溪群等构成。变质基底之上不整合覆盖有下江群、板溪群等的砂页岩、火山碎屑岩夹碳酸盐岩,其时代相当于新元古代青白口系,它们已普遍轻微变质褶皱。这套地层磁性很弱,显示为降低磁异常背景区,其中发育有平缓的正背景场应是中新元古界之下变质较深、含有中基性火山岩组分的结晶岩系的反映。变化异常主要是侵入基底的中基性岩浆岩的反映。全区从震旦纪到三叠纪大部分地区处于稳定的构造环境中,盖层除缺失泥盆系外,总体比较齐全,但各地发育程度不一。沉积盖层在洞庭湖盆地主要为中新生界,古生界较薄,拗陷内厚 $3000\sim 7000$  m,隆起上厚 $500\sim 1000$  m;在江南隆起北

缘拗陷带上主要被古生界和中生界充填,拗陷内厚5000~7000 m,隆起上厚1000~3000 m;江南隆起南缘拗陷带主要为古生界,拗陷内厚3000~9000 m,隆起上厚2000~3000 m;百色拗陷区主要为上古生界和三叠系,厚3000~7000 m;十万大山盆地为古生界和中生界,厚3000~7000 m;楚雄盆地主要为侏罗系和三叠系,拗陷内厚5000~9000 m,隆起上厚1000~4000 m。峨眉山玄武岩集中分布于川南滇北地区。

#### 5.4 天山—兴安造山系

位于中国北部,南界大致位于和龙、桦甸、克什腾旗、白云鄂博、阿拉善右旗、安西、焉耆一线,北界至国界,包括天山、准噶尔、阿尔泰、北山、内蒙古高原北部、大小兴安岭和吉黑等地区。磁场主要以剧烈变化、条带状磁异常为特征,多由互不相连、相间排列的正、负条带状异常组成,其中发育有块状磁异常,强度-350~600 nT;剩余重力场以走向多变的重力异常为特征。异常走向由西向东呈北西向、东西向和北东向展布。需要指出,笔者将敦煌地区划归天山—兴安造山系,与任纪舜等(1999)划法相同,但潘桂棠等(2015)将该区划归塔里木陆块区。从磁场特征看出,该造山系由兴安弧盆系、阿尔泰弧盆系、准噶尔—吐哈地块、伊宁—中天山地块、北山地块和吉黑地块组成。

##### 5.4.1 兴安弧盆系

位于大兴安岭和内蒙北部,总体走向北东向。磁场以剧烈变化磁异常为特点,异常强度大,梯度陡,局部异常呈条带状,强度-200~500 nT不等,磁异常走向在内蒙高原北部异常走向主要为北东向,在大兴安岭主要为北东向。在中部的根河—齐齐哈尔地区发育一个呈北西向展布的强磁性块体,这是古元古界结晶地块存在的有力证据,它在磁场上引起了宽缓升高的正磁异常。围绕这个块体的是降低的负磁异常区,表明弧盆系的变质基底主要由弱磁性的中、新元古界构成,其中残留有古元古界强磁性结晶地块。其中,磁力高主要是基底隆起及晚古生代和中生代岩浆岩的反映,在磁场相对平缓的地区主要是断陷盆地的反映,盆地中充填了上古生界和厚度较大的中生界陆相含煤、油页岩、碎屑岩系及中基性火山岩系。沿二连—贺根山发育有蛇绿岩,这被认为是蒙古西伯利亚古陆的一次俯冲活动,其北侧分布的中基性火山岩及花岗岩

带被认为是古岛弧带,磁场上沿这一线剧烈升高磁异常带就是其综合反应。可见弧盆系构造变动强烈,伴随的岩浆活动剧烈,它是一个典型的构造活动区。本区最大的盆地是海拉尔盆地和二连盆地。海拉尔盆地主要被上古生界、侏罗系和白垩系充填,在侏罗纪和白垩纪时期发生了火山喷发,形成了中酸性火山岩建造,在拗陷内厚3000~9000 m,隆起上厚500~2500 m;二连盆地沉积盖层为上古生界海相沉积和中新生界陆相沉积,在拗陷内厚3000~9000 m,隆起上小于600 m。

##### 5.4.2 阿尔泰弧盆系

位于阿尔泰地区。磁场反映为剧烈变化的磁异常区,异常强度大,梯度陡,强度-360~600 nT,异常轴向呈北西向,由多个相间排列的正、负条带状异常组成。区内出露最老的地层为新元古界或寒武系变质岩系,志留系见有变质的碎屑岩,泥盆系、石炭系发育有火山岩系。区内以晚古生代为主的花岗岩类十分发育,并形成巨大的花岗岩链。负磁场应是中新元古界和下古生界中浅变质岩系的反映,而那些块状正异常主要与晚古生代中酸性侵入岩有关,但其中可能残留有中下奥陶统、震旦—寒武系(或古元古界)强磁性变质岩系。

##### 5.4.3 准噶尔—吐哈地块

位于准噶尔、吐鲁番、哈密地区。磁场中部以块状正磁异常为主,四周被负磁异常围绕,强度-250~300 nT。推测准噶尔盆地的块状正磁异常应是古元古界具强磁性结晶岩系的反映,其上可能覆盖有下古生界(或中新元古生界)变质岩系。泥盆—石炭纪在准噶尔北侧主要发育陆缘碎屑复理石及中基性火山岩系,在南部发育北天山博罗科努深海槽带,中间的准噶尔盆地区基底相应下沉为水下台地,泥盆—石炭系沉积厚度不大,二叠纪发育陆相碎屑岩并伴有中酸性火山活动,中新生界为厚达万米的陆相碎屑及含煤建造。盆地周缘以火山喷发为主,形成晚古生代大面积分布的火山岩系。准噶尔盆地和吐哈盆地是在稳定的结晶地块之上发育起来的,构造稳定,沉积盖层为上古生界和中新生界,厚5000~15000 m。而其他区域则构造变动大,岩浆活动剧烈,沉积层受到了强烈的改造,上古生界大面积出露。准噶尔盆地中新生界厚数百至8000 m,上古生界厚2000~7000 m,隆起为低隆起;

吐哈盆地坳陷内厚 5000~9000 m, 隆起属于长期隆起区, 中新界分布于低洼地区, 厚 1000~2000 m。

#### 5.4.4 伊宁—中天山地块

位于伊宁盆地和天山地区。磁场上以北西走向的条带状正负磁异常为特征, 强度 -350~500 nT。区内块状正异常应是古元古界强磁性结晶岩系和中酸性侵入岩的共同反映, 平缓的负磁场是中新元古界和下古生界弱磁性变质岩的反映, 而那些条带状的局部磁异常是火山岩系的反映。北部降低平缓磁场带对应着北天山泥盆—石炭系很厚的细碎屑及火山岩系沉积区; 南部平缓磁场带对应着南天山志留—泥盆系很厚的陆缘—碳酸盐岩及火山岩系沉积区。中部线性磁异常带与中天山元古宇—下古生界隆起带对应, 其两侧广泛出露有元古宇深变质杂岩, 并发育一系列中基性、基性—超基性岩浆岩带, 推断磁力高带是它们的综合反应。地块的构造变动多表现为大幅度隆升和沉降, 从而使基底起伏变化大, 隆起区基底裸露或浅埋, 盆地地区基底埋藏深, 沉积盖层厚。航磁反映出伊宁盆地可能发育一个构造相对稳定的古元古界结晶块体。其上被上古生界、中生界覆盖, 这套地层在坳陷内厚 3000~7000 m。

#### 5.4.5 北山地块

位于河西走廊北部的北山地区, 总体走向东西向。磁场以剧烈变化磁异常为特点, 背景场以平缓降低场为特征, 其上叠加了磁异常带, 异常梯度陡, 强度 -100~100 nT。在地块南部古元古界变质岩系已出露, 上覆奥陶—志留系中浅变质岩系, 发育在这一地区的磁异常带与其有关。但北部大部分地区沉积了古生界碎屑岩及火山岩系, 并发育一系列早古生代中酸性岩。在北山中部出露有古元古界北山群结晶杂岩及中新元古界变质岩系, 古元古界北山群可能是引起块状正磁异常的主因。在敦煌—安西地区分布有北东向条块状升高磁异常带, 应是沿带出露的古元古界敦煌岩群的反映。那些磁异常带多与岩浆岩有关。本区构造走向主要为东西向, 仅在额济纳旗及银根地区发育有北东向构造, 它分割了东西向构造的连续性。地块内最大的盆地是银根—额济纳旗盆地, 沉积盖层为上古生界和中新界, 在坳陷中厚 2000~5000 m, 隆起上厚度小于 1000 m; 敦煌盆地沉积盖层主要为中新界,

厚 2000~7000 m。

#### 5.4.6 吉黑地块

位于大兴安岭东部的松辽地区。磁场以北东走向的负磁场为主, 并发育有不同走向的正磁异常条带, 磁异常强度 -300~300 nT。区内正异常是古元古界麻山群和中酸性岩体的共同反映, 区域性负磁场应由元古宇和寒武系弱磁性变质岩系引起。在地块东部的佳木斯及周围地区古元古界麻山群及中新元古界黑龙江群、马家街群已出露地表, 被称为布列亚—佳木斯微陆块或佳木斯地块(任纪舜等, 1999)。其上覆盖有下古生界滨浅海相碎屑岩及生物灰岩沉积, 上古生界陆相含煤碎屑岩及中基性火山岩系和中生界滨海陆相碎屑及火山、红色类磨拉石建造。磁场特征反映吉黑地块的基底主要由弱磁性的元古宇变质岩系构成, 古元古界强磁性结晶地块以小型块体残留于地块中, 在磁场上引起宽缓的正磁异常。沉积盖层主要发育于盆地, 厚 3000~9000 m 不等。中生代沉积集中分布在松辽盆地和三江盆地的坳陷内, 沉积厚度较大。古生界为滨浅海相沉积, 厚 2500~4500 m, 中新界厚 4000~6000 m。

### 5.5 昆仑—祁连—秦岭造山系

位于中国中部的昆仑山、阿尔金山、祁连山、秦岭、大别山及山东半岛南部地区, 北部与天山—兴安造山系、华北陆块区相接, 西部与塔里木陆块区相邻, 南界大致沿库尔塔什干、琼木孜塔格峰、衣山干、纳赤台、天水、宁陕、城口、襄樊、广济及山东半岛南缘一线, 也称之为中央造山系。该造山系总体呈北西走向, 主要由线性正磁异常带和块状正负磁场区组成, 异常走向多为北西向, 并有北北西向异常。剩余重力场表现为重力异常走向变化大, 规律性不强的特点。依据磁异常特征可分为祁连弧盆系、西昆仑弧盆系、东昆仑弧盆系、阿尔金弧盆系、柴达木地块、秦岭—大别地块和苏鲁地块。

#### 5.5.1 祁连弧盆系

位于祁连山和河西走廊地区。磁场以正负磁场为特征, 其上叠加有北西向线性正磁异常带, 正磁异常强度为 50~200 nT。航磁还反映出弧盆系的基底主要由元古宇变质岩系构成, 但东部和西部的基底性质是不同的, 西部主要由中新元古界和下古生界弱磁性变质岩系组成, 而东部地区存在一个古

元古界结晶块体,其特点是结晶程度高、磁性强,在磁场上反映为正磁场。该块体构造十分稳定,故在这一区域发育了一些沉积盆地,其内主要发育上古生界和中新生界。酒泉—民乐盆地主要被中新生界充填,厚度大部分为3000~8000 m;武威盆地上古生界和中新生界厚度较大,拗陷内厚3000~5000 m;陇西盆地中新生界直接覆盖在变质基底之上,拗陷内厚3000~5000 m;潮水盆地主要为中新生界,拗陷内厚2000~3000 m;巴彦浩特盆地主要为中新生界,古生界分布不均匀,厚度薄,拗陷内厚5000~7000 m,隆起上小于3000 m。

### 5.5.2 西昆仑弧盆系

位于西昆仑山地区。航磁显示为北西向强度较大的正磁异常带,强度100~200 nT,最高可达800 nT以上。分布于红其拉甫山口的古元古界条带状片麻岩磁性相当强。另外,燕山期和华力西期花岗岩有较强的磁性。据此认为,西昆仑西段的强磁异常主要是由古、中元古界变质岩系和不同时代的花岗岩类引起。另外,从航磁图上可见,西昆仑东段,塔南北东向以正为主的强磁异常带与西昆仑强磁异常带相交,似有“嵌入”之势。朱英(2013)认为,新疆最南部的高山,以及在塔里木盆地南缘的边缘山系都是在塔南古陆的基础上发育起来的。因此,在西昆仑东段深部有可能存在太古宇结晶基底。

### 5.5.3 东昆仑弧盆系

位于东昆仑地区,走向北西西向。磁场反映为正、负变化的磁异常区,磁异常以负为主,仅在东部发育有范围不大的宽缓升高正磁异常区,而南部为变化的正磁异常带。从磁场特征分析,平缓降低的磁异常是广泛发育且厚度很大的下古生界中基性火山岩、碎屑岩及碳酸盐岩的反映,这套岩系厚达6000~8000 m,轻微变质,在柴达木盆地西部已有十余口井钻遇这套岩系,说明东昆仑弧盆系的基底主要由中新元古界和下古生界弱磁性变质岩构成,仅在其东部的格尔木以北和南部残留有新太古—古元古界较强磁性的结晶块体,是金水口岩群构成的柴达木结晶地块的一部分。沿东昆仑山已见元古宇和新太古界及晚古生代中酸性侵入岩体大面积出露,它们在磁场上引起了较剧烈变化的正异常。上古生界分布普遍,为半深海槽盆沉积;中新生代为陆相沉积。航磁反映出弧盆系的基底起伏变化

很大,在南部地区元古宇变质基底已出露地表,在一些山间拗陷中基底埋深为2000~3000 m。

值得指出的是,东、西昆仑构造区区别较大。从磁场上看,西昆仑弧盆系磁场为正异常带,该区一直处于隆起状态,古生界已被剥蚀殆尽,其基底可能与塔南陆块相当。而东昆仑弧盆系磁场区以负异常为主,表明东昆仑变质基底主要由中上元古界变质岩系组成,其基底性质与祁连弧盆系相同,但东昆仑隆起幅度不大,其上仍有一定厚度的古生界和中新生界。磁场差异表明东、西昆仑受阿尔金断裂的分割基底组成、构造变动、沉积层保存情况是不同的,其在构造上应不属于同一构造区。

### 5.5.4 阿尔金弧盆系

位于阿尔金山、喀什塔什山及民丰、且末和若羌地区,走向北东向。需要说明的是,依据磁场特征,将原属塔里木陆块区的民丰、且末和若羌地区划归阿尔金弧盆系,命名为且末拗陷带。阿尔金异常带宽30~180 km,最南端与西昆仑正异常带交汇。异常带由正负异常组成,强度-100~100 nT。沿带见有古元古界阿尔金山群和中元古界蓟县系变质岩系出露,并与正负磁异常相对应。这些变质岩系磁性很弱,在磁场上反映为负磁场区,不可能引起区域性正磁异常。从磁异常特征分析,该正异常与西昆仑东段正异常相连,并可以对比。据此推测中元古界之下分布有古元古界布伦库勒群,这套变质岩系具有强磁性,它是引起正异常的主因。在阿尔金山北坡出露太古宇米兰群,虽然其与块状正磁异常对应,但不是引起正异常的主因。负异常是阿尔金山群和中元古界长城系弱磁性变质岩系的反映。沉积盖层为上古生界和中新生界,多发育在且末拗陷带内,厚2000~5000 m,局部达7000~13000 m。

### 5.5.5 柴达木地块

位于柴达木盆地。在磁场上以区域性正、负磁场为特征,强度为-40~60 nT。块状正异常位于格尔木北部,是由金水口岩群变质岩系引起,区域性负磁场区应是中新元古界弱磁性变质岩系的反映。在柴达木盆地内已有十几口井钻到元古宙花岗片麻岩基底,并见有下古生界轻微变质岩系且构成基底,其上不整合覆盖有泥盆系红色磨拉石建造,石炭—二叠系海陆相碎屑及含煤建造,中下侏罗统一

白垩系河湖相红色碎屑及含煤建造,新生界为河湖相红色碎屑。沉积盖层主要分布于柴达木盆地,以中新界为主,其中,新生界最发育,厚3000~16000 m,中生界厚500~1800 m。

#### 5.5.6 秦岭—大别地块

位于秦岭、大别山地区,总体走向北西向。磁场以宽缓变化正负磁场区为特征,强度为-100~100 nT。其中发育有线性变化的正磁异常带,强度30~200 nT不等。区内变化的正磁异常带是不同时代岩浆岩的反映,那些宽缓的正磁场区主要是古元古界大别山岩群、秦岭岩群强磁性变质岩系的反映,而低缓变化的负磁场区则是中新元古界武当山群、红安群、应山岩群、佛子岭岩群中浅变质岩系的反映,这两套地层已大面积出露地表,分别与正、负磁场相对应。在秦岭地区下古生界已发生变质,这套中浅变质岩系对磁场产生一定影响。在大巴山以北地区为坳陷沉积区,沉积了下古生界、泥盆—石炭系及二叠—三叠系,厚1000~5000 m。在印支—燕山期由北向南发生了推覆,形成一系列韧性剪切带和冲断层。沿断裂带发育有“飞来峰”和“构造窗”,并向扬子陆块区仰冲。

#### 5.5.7 苏鲁地块

位于山东半岛南部。磁场反映为北东向展布的正、负磁异常带。地面已见新太古界、古元古界和中生代岩浆岩杂岩大面积出露。基底主要为新太古—早元古代东海群、中元古代海州群和张八岭群。它们在磁场上引起变化的磁异常区。航磁反映出该地块基底未出露的地区埋深也很浅,一般小于1000 m,岩浆活动剧烈,构造走向为北东向。

### 5.6 藏滇造山系

位于西藏、青海南部和西南三江地区。北界大致沿库尔塔什干、琼木孜塔格峰、衣山干、纳赤台、河南、天水一线,东界大致沿武都、康定、丽江、红河一线,南至国界。

该造山系总体呈北西向、近东西走向,主要由线性正磁异常带和块状正负磁场区组成,异常走向多为北西向、近东西向,并有北北西向异常。在剩余重力场上显示出重力异常在西藏地区走向为东西向,在西南三江地区为北西向的特点。雅鲁藏布江缝合带、班公湖—怒江缝合带、金沙江缝合带(任纪舜等,1999)就处于该造山系内,在磁场上都

反映为线性异常带和线性延伸的串珠状异常带。需要说明的是,航磁反映的造山系总体范围与前人(任纪舜等,1999)基本一致,但笔者对西藏地区构造格局看法与前人观点是完全不同的。任纪舜等(1999)、王德发等(2013)和潘桂棠等(2015)认为,青藏地区受班公湖—怒江断裂、龙木错—双湖—澜沧江断裂、拉竹龙—金沙江断裂的控制,使西南三江和西藏地区的构造格局呈向北东突出的弧形。然而,航磁反映出,发育在西南三江地区金沙江、澜沧江、怒江断裂由南东向北西延伸至西藏东部后并未西转,而是继续沿北西向延伸到布若错、雪莲湖等地区,是特提斯断裂系统中单独存在的一组北西向断裂系,它们与青藏近东西向深断裂没有关联,互不隶属,彼此呈相交关系(熊盛青等,2012)。由此认为,青藏地区由西南三江地区北西向构造与西藏地区近东西向构造构成,这一认识改变了青藏地区的构造格局,即青藏地区不存在向北东突出的弧形构造。依据磁异常特征,可划分出松潘—甘孜地块、羌塘地块、昌都地块、冈底斯—念青唐古拉地块、中缅马苏地块、兰坪—思茅地块和理塘弧盆系。

#### 5.6.1 松潘—甘孜地块

位于可可西里、巴颜喀拉山地区,总体走向北西向。磁场由十分平静的正、负磁异常区组成,强度为-40~40 nT,局部异常不发育。大致以玛沁—达日—线为界,以东为平缓变化的正磁场区,强度为40 nT,以西为低缓变化的负磁场区,强度为-40 nT。这种负磁场面貌主要反映出由中新元古界变质岩系组成的弱磁性基底的磁场特征。而位于东部的团块状宽缓升高的磁场区可能与元古宇绿泥石绿帘石片岩、混合花岗岩、花岗片麻岩、绿片岩有关,因为这套变质岩系具有较强的磁性,其时代可能为古元古界,地质界所谓的若尔盖地块可能由这套变质岩系构成。该地块沉积盖层厚度多为5000~11000 m,这与地质上认为的三叠系厚度达4500~23000 m差距是很大的,可见地质上的提法值得商榷。

#### 5.6.2 羌塘地块

位于西藏北部的羌塘地区,总体走向东西向。磁场反映为平静的背景场,说明基底埋藏很深,其中发育有局部磁异常,这是中生代岩浆岩的反映。前震旦纪变质岩系(戈木日群或吉塘群)构成了

地块的基底,在磁场上显示为平静降低的背景场。奥陶—志留系以稳定的陆表海沉积为主,基本上不含火山岩。上古生界为冰海浊积岩—深水碳酸盐岩—基性火山岩组合;三叠系主要为一套碳酸盐岩—类复理石组合,上三叠统含有火山岩系。侏罗系为碎屑岩—碳酸盐岩组合,它们构成了羌塘地块的盖层沉积。这套盖层主要分布于羌塘盆地和龙木错—丁沟拗陷区,在拗陷内厚5000~13000 m,最厚为15000 m,在隆起上为2000~3000 m。磁场反映出地块区构造走向主要为东西向,仅在东部边缘受到昌都地块北西向构造影响,构造走向呈北西向。区内岩浆活动频繁,主要集中在地块中部,东部和西部相对微弱。

### 5.6.3 昌都地块

位于昌都、丽江以北地区。此次研究不但将其单独划分出来,而且包括了原属松潘—甘孜地块西南部的川西北地区。磁场清楚反映为北西向展布的磁异常区,这些磁异常应是不同时代的具磁性的中酸性侵入岩和火山岩系的反映。其基底构成可能较复杂,既有前震旦系宁多群变质岩系,且下奥陶—下志留统变质岩也可能是基底的组成部分。前震旦系变质岩系磁性弱,所以在磁场上反映为平静降低的背景场。古生界和中生界构成了本区的沉积盖层,岩性与羌塘地块可以对比,在雁石坪—昌都盆地这套盖层的拗陷内厚度为5000~11000 m,在隆起上为2000~3000 m。

### 5.6.4 冈底斯—念青唐古拉地块

位于措勤、拉萨地区。在磁场上反映为强度较大、梯度剧烈变化的正负磁异常带,这是由古近纪、新近纪和白垩纪基性、中酸性火山岩、喜马拉雅期和燕山期花岗岩类引起的。在地块内发现3条规模较大的蛇绿岩带,即班公错—怒江蛇绿岩杂岩带,狮泉河—申扎—嘉黎蛇绿混杂岩带,雅鲁藏布蛇绿混杂岩带。后者航磁反映十分醒目,表现为一条近东西走向的线性正磁异常带,强度高达200~1000 nT,宽30~50 km,与地面展布的基性—超基性岩带相对应。在地块内出露最古老的地层为前震旦纪或前奥陶纪念青唐古拉群变质岩系。在墨脱地区分布有大面积混合杂岩,被称为冈底斯群和南迦巴瓦群,它们与中酸性侵入岩共同构成地块的变质基底。沉积盖层应为古生界和中生界。其中,奥陶

—二叠系为陆表海建造系列,中生界主要为复陆屑—浅水碳酸盐岩—火山岩组合。这套地层主要分布于盆地中,厚3000~15000 m。其中措勤盆地厚达7000~15000 m,比如盆地厚5000~11000 m。

### 5.6.5 中缅马苏地块

位于贡山、双江、澜沧地区。磁场反映为变化的正负磁异常带。据地质资料,在该地块西部地区古生界广泛分布,三叠系分布零星,它们构成了地块区的主体沉积,厚度为1000~3000 m,最厚可达5000 m,主要分布于镇康拗陷带内。而在其东部地区已见中元古界澜沧群深变质岩和花岗岩大面积出露,并构成了地块的基底,航磁反映出该地块内岩浆活动比较频繁,而且以火山喷发为主,断裂主要以近南北向展布。

### 5.6.6 兰坪—思茅地块

位于澜沧江以东,红河以西地区。磁场表现为北北西向的磁异常带。在哀牢山地区见有古元古界哀牢山岩群大面积出露,它构成了地块的基底。古生界分布十分零星,在墨江地区见有志留系碎屑岩系出露。沉积盖层主要为上古生界和中生界。上古生界的沉积既有稳定型磨拉石建造、砂泥质和碳酸盐岩建造,又有地槽型的中基性火山岩建造和复理石建造,侏罗—古近纪为陆相沉积。这套地层主要分布于思茅盆地中,厚3000~9000 m。上古生界保存不全,厚1000~4000 m,中生界发育,厚2000~6000 m。

### 5.6.7 理塘弧盆系

位于德格、中甸和木里地区,走向北北西向。磁场上反映为北北西向的异常区,其中见有南北向的异常带。中元古界恰斯群变质岩系和青白口系绿片岩相变质岩系构成了基底。震旦系、早古生代碳酸盐—碎屑岩建造,晚古生代碎屑岩和碳酸盐岩夹基性火山岩建造;早中三叠世为碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩建造,晚三叠世为碳酸盐岩夹中基性—中酸性火山岩组合。沿义敦—沙鲁里为非常醒目的带状花岗岩带。虽然该弧盆系构造变动大、岩浆活动强烈,但仍然沉积了厚度很大的沉积地层,航磁反映出沉积地层厚500~9000 m。

## 5.7 喜马拉雅造山系

位于雅鲁藏布江断裂(F<sub>126</sub>)以南,笔者研究范围仅涉及到喜马拉雅地块。该地块磁异常主要分为

东、西两个部分,东部为负背景场上叠加了北西向的线性高磁异常带,与雅鲁藏布江航磁异常带平行。西部为弱缓负磁场叠加了串珠状弱的正磁异常。在地块南部前震旦系变质岩系广泛出露,在喜马拉雅山称为中新元古界聂拉木群,区域性的负背景磁场主要为这些弱磁性变质岩系的反映。沉积盖层主要为古生界和中生界,厚3000~11000 m。古生界为砂泥岩、板岩及结晶灰岩等沉积,厚4500~5200 m。中生界为碎屑岩及碳酸盐岩建造,厚度很大。该地块区内岩浆活动不很剧烈,以酸性岩浆侵入活动为主,地表见有断续分布的花岗岩,在札达地区见有超基性岩出露。从区域磁场较为平缓表明该地块岩浆岩不发育。

### 5.8 华南造山系

位于北海—江山—绍兴断裂(F<sub>203</sub>)东南,包括武夷山—云开山、东南沿海地区及南海北部珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地、北部湾盆地及海南岛地区,航磁研究范围仅涉及到华夏地块。剩余重力场反映为北东向的重力异常分布区,以负异常为主。南部临海地区磁场以剧烈变化为特征,磁异常走向主要为北东向,强度为-100~300 nT,在东部沿海地区磁异常密集,强度大,这主要反映了中生代火山岩系的分布状况;西部地区磁异常分布变得稀疏,强度变弱,它们与侏罗—白垩纪花岗岩有关。元古宇深变质的云母石英片岩、片岩、斜长角闪岩、辉石斜长变粒岩、花岗片麻岩具强磁性。元古宇混合花岗岩、混合岩、浅粒岩、二云斜长片岩、片麻岩磁性较弱,出露在海南岛地区的元古宇石碌群为弱磁性。广东地区的下古生界变质岩系磁性也较弱。根据岩石磁性特征推测,那些条块状正异常主要是元古宇强磁性变质岩和中酸性岩体的反映,区域性负异常则是前泥盆系弱磁性变质岩系的反映。沉积盖层主要发育在沿海盆地中,厚1000~9000 m。

## 6 讨 论

在本次解释研究过程中,还存在很多现象难以解释,篇幅所限,不在全部列出,笔者将其罗列如下供同行专家讨论:

(1)华北陆块区、扬子陆块区、南塔里木陆块均呈现出相似的北东向的条块状强磁异常带,磁异常走向略有差异,塔里木陆块区为18~28°,扬子陆块

区为29~39°,华北陆块区为44~55°。通过物性调查推断塔南地区的正磁异常应是太古宇结晶岩系的反映,华北陆块区宽缓的正异常应是太古宇强磁性变质基岩的反映,扬子陆块区宽缓的正异常是古元古界变质岩系的反映。3个陆块区何以呈现出这样的异常格局,是偶然还是有成因联系?

(2)秦岭—大别地块为明显的负磁场区上叠加了大量线性高磁异常带,走向多为北西向。西部与弱正磁异常的松潘—甘孜地块相区别,该异常带在西端被松潘—甘孜地块的磁异常分为两支形成“Y”型,其中,沿文县—徽县—凤县分布一条北东向正磁异常带,与地表出露的无磁性的沉积地层不符合,是否存在深部结构与浅部结构的解耦,有待进一步研究。

(3)松潘—甘孜地块东西两端以弱的正磁异常为主,而中部为平静的负磁场。目前较公认的是在松潘—甘孜地块东部的若尔盖地区存在稳定的基底,可能与元古宙绿泥石绿帘石片岩、混合花岗岩、花岗片麻岩、绿片岩有关,因为这套变质岩系具较强的磁性,其时代可能为古元古代。为何西部也存在大面积与东部相似的弱的正磁异常?

## 7 结 论

本次编图是在融合了前人大地构造单元划分的基础上,以磁场面貌及磁性基底埋藏深度(沉积层厚度)为主要依据,结合重力、遥感等资料进行的一次尝试,以期为中国大地构造研究提供地球物理视角。通过编图主要获得以下几点认识。

(1)主要大地构造单元的磁场特征十分明确,如塔里木陆块区、华北陆块区、扬子陆块区,三者都存在走向相似的条块状正磁异常,但扬子陆块区磁异常特征明显不同于塔里木陆块区和华北陆块区,根据磁场分为上扬子陆块、四川—江汉陆块和滇黔桂陆块。上扬子陆块为负磁异常背景叠加线性正磁异常,四川—江汉陆块以条块状正磁异常为特征,滇黔桂陆块为弱的负磁背景场上叠加弱的正磁异常。并且,四川—江汉陆块区的强磁异常带明显有两个走向,一组平行于龙门山构造带,一组平行于秦岭造山带。

(2)华北陆块区东部可大致看出两条南北向分布的正磁异常带,一条是河北保定至安徽阜阳,该带并不连续,而是被负磁异常带分割为数个块状正

磁异常。另一条是郯庐断裂带所显示的线性正磁异常带,值得注意的是,郯庐断裂磁异常带在临沂以北分散呈放射状磁异常带,形状似蒲扇。以郯庐断裂为东边界,在渤海湾西部至合肥盆地南部形成了一个长轴呈南北向展布的椭圆形磁异常区,朱英(2013)认为该区域存在河淮陆核。

(3)根据磁场特征认为,塔里木陆块区的东界应划在策勒、安迪尔、托尔木一线,即以策勒—尾亚断裂为界,而不是沿阿尔金山山根或车儿臣河一线。磁场同时显示出该陆块区未向东延伸,也不与华北陆块区相连接。

(4)华北陆块区的北界应划在和龙—桦甸—四平南—西拉木伦河—克什克腾旗—镶黄旗北—白云鄂博一线,与前人(黄汲清等,1980,任纪舜等,1999;潘桂棠等,2009,2015)的划分方案相比,北移约80 km。西界应划在乌拉特后旗东—阿拉善左旗—同心—宝鸡一线,阿拉善地区背景场以弱的负磁场为主,而鄂尔多斯地区背景场为明显的正、负磁场,二者的磁场面貌有很大差异,本次编图认为阿拉善地块不归属于华北陆块区。

(5)根据磁场特征,将扬子陆块区的西北界划在武都、理县、康定一线,即以武都—康定断裂为界,并非龙门山断裂带,陆块区的西界向西北推移了约90 km,将龙门山构造带划归扬子陆块区。其与华南造山系西南段的界线应划在临川(抚州)、汝城、北流一线,即以北海—江山—绍兴断裂西南段为界。

总之,新编的中国陆域及部分海域航磁系列图,清晰展现了磁场面貌,为中国陆域地质构造研究提供了丰富的深部透视信息,笔者仅能窥其一二,期望通过本文为同行专家提供新的视角,推动中国大地构造研究。鉴于中国陆域地质构造的复杂性,航磁资料局限性和解释的多解性,其中提出的与地质认识不一致的地方还有待进一步证实,还有许多地质现象有待采用综合方法进行深入研究。笔者认为,关注和研究这些不一致的问题是促进地学研究不断深入的重要途径之一,本文主要起到抛砖引玉的作用。

**致谢:**参加本项研究工作的还有范正国、张洪瑞、郭志宏、黄旭钊、周道卿、王万银、王有学等专家,席玉凤、蔡玉梅和贾伟杰等同志负责图件的编

绘,张明华、乔计花等协助编制了中国陆域重力异常相关图件。在此,感谢为此工作曾付出辛苦的同仁们!感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见!

## References

- Cheng Yuqi. 1994. An Introduction to Regional Geology in China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- He Rizheng, Gao Rui, Zheng Hongwei, Zhang Jisheng. Matched-filter analysis of aeromagnetic anomaly in mid-western Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1131-1140 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, Qin Deyu. 1980. The Geotectonic Evolution of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Li Chunyu, Wang Quan, Liu Xueya, Tang Yaoqing. 1982. Tectonic Map of Asian (1:8,000,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Li Siguang. 1973. Introduction to Geomechanics[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Liu Shoupeng. 1989. Aeromagnetic Anomaly Map of China and Its Adjacent Sea Area (1:4000,000) [M]. Beijing: Sino Maps Press (in Chinese).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui. 2015. Explanatory Note to the Tectonic Map of China (1: 2,500,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xin Guangfu, Hao Zhiguo, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1):1-28 (in Chinese with English abstract).
- Qu Guosheng, Wang Shengzu. 1997. Aerial magnetic anomaly-tectonic interpretations in mainland continent and their adjacent seas of China[J]. Scientia Geologica Sinica, 32(4): 455-464 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, Jiang Chunfa, Niu Baogui, Li Jintie, Xie Guanglian, He Zhenjun, Liu Zhigang. 1999. Chinese Tectonics from a Global View-instruction of Tectonic Map of China and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wan Tianfeng. 2011. The Tectonics of China—Data, Maps and Evolution[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Defa, Wang Naidong, Zhang Yongjun, Zou Weilei, Zhang Derun. 2013. Aeromagnetic Series Maps and Its Explanatory Note in Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Area[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Tao, Xu Mingjie, Wang Liangshu, Liu Shaowen, Hu Xuzhi. Aeromagnetic anomaly analysis of Ordos and adjacent regions and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007,

- 50(1): 163–170 (in Chinese with English abstract).
- Wang Youxue, Jiang Mei, Xiong Shengqing, Xue Ddianjun, Wittlinger G, Paul A. 2006. Delamination of the lithosphere below the West Kunlun and its tectonic implications—evidence from Seismic tomographic images and aeromagnetic anomalies[J]. *Geology in China*, 33(2): 299–308 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shengqing, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2012. Characteristics of gravity and magnetic field in Xizang (Tibet) and new understanding on tectonic framework in Eastern Xizang[J]. *Geological Review*, 58(2):201–207 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shengqing, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2015a. Map of Magnetic Basement Depth in Chinese Continent (1:2,500,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xiong Shengqing, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2015b. Map of Regional Structure in Chinese Continent (1:2,500,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xiong Shengqing, Fan Zhengguo, Zhang Hongrui. 2013. Series Map of Aeromagnetic in Chinese Continent and Its Explanatory Note (1:5,000,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xiong Shengqing, Fan Zhengguo, Zhang Hongrui. 2015c. Series Map of Aeromagnetic in Chinese Continent and Its Explanatory Note (1:2,500,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yang Hua, Liang Yueming. 2013. Nationwide aeromagnetic  $\Delta T$  anomalies and China's geoscience block structures[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(6):957–967 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changda. 2013. Research on Development of Magnetism and Time Domain Electromagnetic Method[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Zhang Jiangsheng, Lao Qiuyuan, Li Yan. 1999. Tectonic implication of aeromagnetic anomaly and evolution of Huabei–South Tarim–Yangtze superlandmass[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 379–390 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenyu. 1986. Tectonics of Land and Sea in China and Its Adjacent Area[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu Ying. 1989. Some geotectonic problems around eastern margin of the Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 32(4):399–408 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Ying. 2013. Tectonic and Deep Structure of China and Its Adjacent Area—preliminary Interpretation of Aeromagnetic Map of China(1:1000,000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京:地质出版社.
- 贺日政, 高锐, 郑洪伟, 张季生. 2007. 青藏高原中西部航磁异常的匹配滤波分析与构造意义[J]. *地球物理学报*, 50(4):1131–1140.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京:科学出版社.
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图(1:800万)[M]. 北京:地质出版社.
- 李四光. 1973. 地质力学概论[M]. 北京:科学出版社.
- 刘寿彭. 1989. 1:400万中国及其毗邻海区航空磁力异常图[M]. 北京:中国地图出版社.
- 潘桂棠, 肖庆辉. 2015. 中国大地构造图(1:250万)说明书[M]. 北京:地质出版社.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1):1–28.
- 曲国胜, 王绳祖. 1997. 中国大陆及邻近海域航磁——大地构造解释及分区[J]. *地质科学*, 32(4):455–464.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦铁, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京:地质出版社.
- 万天丰. 2011. 中国大地构造学[M]. 北京:地质出版社.
- 王德发, 王乃东, 张永军, 邹为雷, 张德润. 2013. 青藏高原及邻区航磁系列图及说明书[M]. 北京:地质出版社.
- 王涛, 徐鸣洁, 王良书, 刘绍文, 胡旭之. 鄂尔多斯及邻区航磁异常特征及其大地构造意义[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(1):163–170.
- 王有学, 姜枚, 熊盛青, 薛典军, Wittlinger G, Paul A. 2006. 西昆仑岩石圈的拆沉作用及其深部构造含义——地震层析成像及航磁异常证据[J]. *中国地质*, 33(2):299–308.
- 熊盛青, 丁燕云, 李占奎. 2012. 西藏地区重磁场特征及藏东构造格局新认识[J]. *地质论评*, 58(2):201–207.
- 熊盛青, 丁燕云, 李占奎. 2015a. 中国陆域磁性基底深度图(1:250万)[M]. 北京:地质出版社.
- 熊盛青, 丁燕云, 李占奎. 2015b. 中国陆域区域构造图(1:250万)[M]. 北京:地质出版社.
- 熊盛青, 范正国, 张洪瑞. 2013. 中国陆域航磁系列图及说明书(1:500万)[M].北京:地质出版社.
- 熊盛青, 范正国, 张洪瑞. 2015c. 中国陆域航磁系列图及说明书(1:250万)[M].北京:地质出版社.
- 杨华, 梁月明. 2013. 全国航磁 $\Delta T$ 异常与中国地学断块构造[J]. *物探与化探*, 37(6):957–967.
- 张昌达. 2013. 重磁与时间域电磁法发展趋势研究[M].武汉:中国地质大学出版社.
- 张家声, 劳秋元, 李燕. 1999. 航磁异常的构造解释和华北—塔南—扬子超陆块演化[J]. *地学前缘*, 6(4):379–390.
- 张文佑. 1986. 中国及邻区海陆大地构造[M]. 北京:科学出版社.
- 朱英. 1989. 塔里木盆地东缘的若干大地构造问题[J]. *地球物理学报*, 32(4):399–408.
- 朱英. 2013. 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]. 北京:地质出版社.