

国家科技攻关计划

国家高新技术研究计划（“863”计划） 联合资助

中国地质调查局

中高山区

高精度航磁方法技术

熊盛青 于长春 等著



地质出版社

国 家 科 技 攻 关 计 划

国家高新技术研究计划(“863”计划) 联合资助

中 国 地 质 调 查 局

中 高 山 区 高精度航磁方法技术

熊盛青 于长春 睦素文 著
王万银 薛典军 王乃东

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

作者针对中国中高山区航磁测量面临的问题,系统总结自1996年以来在中高山区开展的国家科技部“九五”及“十五”科技攻关专题、“十一五”国家“863”计划课题、中国地质调查局科研项目以及实际高精度航磁测量的有关成果,提出了进一步开展中高山区航磁测量的系统方案。全书分为九章,分为概论、中高山区航磁测量方法技术、数据处理、数据成图、信息增强、起伏条件下位场处理及反演解释、以航磁资料为主的多源信息成矿定量预测及结语。

本书可供物探工作者,勘探地质工作者以及大专院校有关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

中高山区高精度航磁方法技术/熊盛青等著. —北京:
地质出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-116-06325-9

I. 中… II. 熊… III. 中高山区—航空物探—磁法勘探—
研究 IV. P631.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第169007号

责任编辑:陈军中

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:889 mm×1194 mm¹/16

印 张:12.25

字 数:320千字

印 数:1—800册

版 次:2009年6月北京第1版·第1次印刷

审图号:GS(2009)1582号

定 价:38.00元

书 号:ISBN 978-7-116-06325-9

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序 1

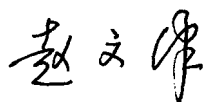
《中高山区高精度航磁方法技术》的出版，标志着中国多年中高山区航空磁测方法技术的发展达到了一个新的水平，并在多方面居于国际领先的地位，这是可喜可贺的！

中国是一个多山的国家，山区相对来说是经济欠发达地区，但它又是成矿条件较有利的地区。加快在山区，特别是在中高山区的地质调查和找矿工作既是一项迫切需要进行的工作，也是一项重大的技术挑战。“中高山区高精度航磁方法技术”的开发成功和应用，有力地推动了中国中西部山区的地质调查和找矿工作，取得了许多地质成果，意义重大。

提高中高山区航空磁测测量精度，取决于：①航空磁测仪器的灵敏度和观测精度。这方面，使用的中国自主研发的氦光泵磁力仪是处于国际领先水平的。②测量飞机的性能，即高海拔低空飞行性能，爬坡性能以及适应航空磁测工作的性能。③精确的航迹导航定位的能力。④对取得的曲面上航测数据进行多项改正，以获得一张可靠的高精度的磁测图件，能够反映地下地质情况，特别是能检测出起伏很大地段的相对弱小异常，能满足相应比例尺测量的要求。⑤对多种航磁图件的地质解释。这是一项系统工程，孤立的任何一部分的工作都是不能得到最终效果的。

本书集中反映了以熊盛青总工程师为首的中国国土资源航空物探遥感中心的技术群体多年来在上述几个方面所做的系统研究与取得的突破性成果，其中许多成果已获得国家和部级的大奖。

高精度航磁图的获得，应当说仅仅是解决地质找矿问题的第一步。由于航磁可以迅速地完成大面积的调查，数据量大，磁测结果的地质解释就有一定的难度，常常需要有多学科的结合进行地质解释，加之探测的地质对象性质变化范围可能很大等，地质解释和成果的应用就不可能一次完成。因此，不断深入地做工作，发动用户做工作就很重要。希望未来在这方面能创造出更多的成果出来。

中国工程院院士 

2009.05.04

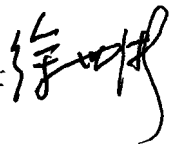
序 2

航空磁法是最早采用的航空地球物理方法，是地质和矿产勘查中广泛使用的方法。航磁测量为我国的地质找矿和国民经济建设做出了突出贡献，但是在我国的中西部地区，航空磁测工作程度仍很低。20 世纪 90 年代末期以来，随着国家开发大西部战略的实施，我国矿业发展的重心将逐步向西部转移，西部地区必将成为我国能源和原材料资源的重要生产基地。西部地区位于包括两个世界级构造成矿带在内的三大成矿带和四大油气富集盆地，成矿地区条件特别优越。中高山区的定义为高差大于 500m，海拔高度大于 1000m 的起伏山地；按照这个标准，我国的中西部地区是中高山区分布的主要地区。在我国西部中高山区开展航空磁测工作已成为当前的急需，与它配套的中高山区航空磁测特殊的采集、处理与解释技术的研究更为突出。

通过十多年来的不断探索与实践，我国中高山区航磁方法技术取得了长足进步，形成了一套中高山区高精度航磁方法技术体系。作者针对中高山地区地形复杂和气候多变等自然因素，提出了适用于中高山区航磁测量的方法技术；提出了高度改正等航磁测量数据的处理方法；针对中高山地区快速成图需要及磁异常与高度资料对应分析的需要提出了中高山数据成图方法；探讨了改进非线性滤波，结构逻辑法、小波变换等方法提取弱异常的方法，为解决中高山区航磁测量因飞行高度大，得到的磁异常信息相对较弱提供了理论方法；开发了频率域偶层位曲面位场处理及转换方法，具有适应性强、精度高和计算快的优点，适用于航磁大面积的数据处理，便于在生产实践中推广应用；研制了测量面起伏条件下的二维、三维最优化反演方法和应用软件；最后针对航磁资料综合快速解释的需要，研究了利用 GIS 进行成矿预测的方法技术。上述一系列方法的成功研发，结束了中高山区航磁资料处理使用平面处理方法的局面，有助于提高中高山区航磁测量、数据处理与异常解释的精度；它不仅为加快我国西部中高山区地质调查工作提供了技术支撑，也为西部地区矿产资源快速勘查评价，实现找矿突破提供了新的勘查手段和重要找矿线索，促进了我国航空物探技术进步。

该书是我国第一本系统全面论述中高山区高精度航磁方法技术的专著，包括了适用于中高山区航磁测量的数据采集、处理、成图及航磁异常解释等系统的方法技术内容。该书可以作为大学本科生、专科生的选用教材，研究生的参考书，也可以为从事地球物理工作的技术人员在解决生产、科研实际问题时提供参考。

中国科学院院士



2009. 6. 5

前 言

中高山区航磁问题的提出直接源于国家经济建设发展的需求。20 世纪 90 年代, 中国提出了开发大西北的战略, 原地质矿产部提出了一系列西部矿产资源勘查计划, 如西南三江特别找矿计划等, 希望采取航磁等高新技术快速查明西部矿产资源潜力, 加快找矿步伐, 为西部大开发提供资源保障。

中高山区通常是指高差大于 500m, 海拔高度大于 1000m 的复杂山地。中国中高山区主要分布在青藏高原、新疆天山地区、云南三江地区、陕西秦岭地区、山西中条山地区、东北大小兴安岭地区等。在这些地区已发现了许多大中型铁矿、铜多金属矿, 已划分了西南三江成矿带、雅鲁藏布江成矿带、天山成矿带、西昆仑-阿尔金成矿带、阿尔泰成矿带、北山成矿带、秦岭成矿带等十多个成矿带, 这些成矿带存在着巨大的矿产资源潜力。尽快查明这些地区的矿产资源, 对于中国经济社会的持续发展有着巨大的经济和政治意义。

新中国成立以来, 地质工作者不畏艰险, 风餐露宿, 克服高山缺氧、交通不便等不利因素, 在中高山区做了大量工作, 取得了丰富成果; 但仍还存在一些空白区。这些空白区有的是常年积雪、森林密布, 有的是受悬崖峭壁、峡谷急流阻隔无法逾越, 更多的是人迹罕至的生命禁区。地面地质工作主要以露头矿、浅部矿勘查为主, 对于中深部矿的勘查则需借助物探勘查方法; 受勘查仪器使用条件、方法条件限制, 只能选择交通条件、地形条件较好的地区开展工作, 因此工作量受到很大限制。

航空磁力测量(简称航磁测量)是将航空磁力仪及其配套的辅助设备装载在飞行器上, 在测量地区上空按照预先设定的测线 and 高度对地磁场强度或梯度进行测量的地球物理方法。与地面磁测相比具有快速、高效、成本相对较低等特点, 且不受水域、森林、沼泽、沙漠和高山的限制。同时由于飞行是在距地表一定的高度进行的, 从而减弱了地表磁性不均匀体的影响, 能够更加清楚地反映出深部地质体的磁场特征。

中国中高山区航磁测量始于 1957 年, 至 1984 年, 先后对东北大小兴安岭、长白山、内蒙古高原、云贵高原、新疆天山、甘肃祁连山、四川西部、西藏东部等地进行了 1:10 万至 1:100 万的大规模航磁调查工作。这些工作为查明西部地区的地质构造特征, 评价矿产资源远景发挥了巨大作用, 并以航磁异常为线索发现了许多矿产资源。

由于受技术、经济以及中高山区特殊的地理、气候和气象、空中和地面保障等条件的限制, 中高山区航磁工作的开展受到了影响。自 1985 年以后, 中高山区的中、大比例尺航磁测量工作基本停滞, 西部很多地区仍是中大比例尺高精度航磁测量空白区。

20 世纪 90 年代中后期以来, 航空物探及相关技术的发展为开展中高山区航磁提供了基础, 尤其是高灵敏度氦光泵磁力仪的成功研制, 实时数字磁干扰补偿技术以及 GPS 导航定位技术的发展, 使得在中高山地区开展高精度航磁工作具备了基本的技术条件。由于中高山地区海拔高、气温低、气候多变、机场数量少, 同时存在缺少续航能力强、低空性能好的机型, 缺乏先进的导航定位方法、实用的起伏测量面条件下解释技术及认可的飞行测量方法等因素, 中高山区航磁测量发展比较缓慢。

随着国家开发大西部战略的实施和地质找矿工作重点的西移, 国家对西部中高山区航磁测量工作的需求量明显增大, 迫切需要研究解决中高山区的飞行测量方法及相应的资料处理解释方法等有关技术问题, 并为这些地区的航磁测量工作提供技术支持。

从 1996 年开始, 国家科技部在“九五”科技攻关课题中设立了“中高山区高精度航磁和微波遥感方法技术研究”专题, “十五”科技攻关课题中设立了“复杂地形区高精度航磁方法研究”专题, 针对中高山航磁方法技术开展专门研究。“十一五”设立的“863”计划重大项目“航空地球物理勘查技术

系统”下属“航空物探、遥感多方法综合勘查系统集成”课题中也安排了与中高山高精度航磁方法技术有关的研究内容。另外，中国地质调查局在1999年设立了“中高山航磁测量方法预研究”科研项目。上述研究工作取得了可喜的成果，并已经在中高山地区航磁测量工作中发挥了重要作用。

1996年末至1997年初，在云南大理地区、甘肃西秦岭地区使用Y12飞机完成了1:20万高精度航磁测量，1998年在云南中甸使用Y12飞机完成了1:10万高精度航磁测量，1998年在青藏高原中西部使用呼唤Ⅱ型飞机完成了1:100万航磁测量，等等。这些工作的开展探讨并解决了一系列中高山航磁方法技术问题，为开展中高山高精度航磁积累了经验，并取得了丰富的科研和地质调查成果。随后相继在中高山地区开展了1:20万航磁测量，测量面积近 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，近期在新疆西天山、昆仑山和阿尔金山等地区开展了1:5万航磁测量。目前，每年均布置有相当工作量的中高山地区航磁测量工作。

本书是在对上述科研成果及1996年以来中高山地区实际高精度航磁测量有关成果系统分析总结的基础上撰写而成的，包括野外数据采集、数据处理及航磁异常解释三个主要方面，论述了下列几个问题：

1) 针对中高山地区海拔高、气温低、气候多变、机场密度小的特点及中大比例尺高精度航磁测量需要，重点探讨了飞机选型原则及航磁测量系统集成问题；针对在中大比例尺航磁测量时，飞行高度不易下降，影响测量效果的问题，在研究不同测量比例尺、不同高度测量效果基础上，探讨了降低飞行高度方法及途径。

2) 针对中高山地区及新时期地质勘查工作特点，提出了中高山航磁测量兼顾区域地质调查和找矿两个方面的综合勘查思想，并开展有关解释方法技术研究。前者要求测区相邻测线飞行高度相差小，区域磁场面貌不受高度影响，便于全区磁场对比分析。后者需要尽可能减少飞机离地高度，最大限度获取磁场信息，以便尽可能发现异常。

根据区域地质构造解释研究需要，研究利用GPS高程数据建立理想测量面的方法进行剖面高度改正思路，减少相邻测线及局部区域测量高度引起的磁场差异，以期形成区域可对比的磁场图。针对地质找矿的需要，研究了测量面起伏条件下位场处理和异常定量解释方法。

3) 从成图和数据处理的两个方面研究了飞行高度过高而磁场信息弱的条件下提取可靠弱小异常方法和标准。针对航磁资料综合快速解释的需要，探讨了利用GIS进行成矿预测的方法技术。

全书共分九章，主要内容如下：

第一章 概论：分析了我国山地和地形特点，给出了中高山定义；简单回顾了我国航磁尤其是中高山航磁的发展历程及现状；总结了中高山航磁存在的主要问题；提出了研究和解决中高山航磁问题的思路。

第二章 中高山地区航磁测量方法技术：针对中高山地区航磁测量危险因素，确定了飞机选型和测量系统集成方案；在总结以往测区测量比例尺、飞行高度与测量效果之间关系基础上，提出了依据三维航迹辅助设计减少飞行高度对磁测效果影响的解决方案。

第三章 中高山地区航磁测量数据处理方法：分析了目前航磁测量处理方法存在问题，探讨了工作区日变改正方法及航磁测量中数字地形高程资料获取方法和精度，提出了航磁异常高度改正方法和方案——基于理想飞行面的联合求解法。

第四章 中高山地区航磁数据成图方法：针对中高山地区快速成图需要及磁异常与高度资料对应分析的需要，提出了彩色渐变平面剖面图和立体剖面图绘制方法。

第五章 信息增强方法：在通过实例分析中高山地区航磁弱异常可靠性基础上，探讨了改进非线性滤波、结构逻辑法、图形图像、小波变换等方法提取弱磁异常的效果。

第六章 测量面起伏条件下位场处理方法：针对中高山地区测量面为起伏曲面的问题，研究了曲面位场转换方法和精度，并给出了实际资料处理方案。

第七章 测量面起伏条件下反演解释方法：为提高中高山地区航磁定量反演精度，研究了测量面起伏条件下磁化强度填图、二维、三维最优化反演方法，并给出了实际应用效果。

第八章 以航磁资料为主的多源信息成矿定量预测方法：探讨了基于 MapGIS 平台，联合使用层次分析法、灰色系统理论方法，对以航磁信息为主的多源成矿信息进行快速评价方法，并通过实际地区应用给出了方法使用流程及效果。

第九章 结语。

中高山航磁测量方法技术研究自 1996 年初开始，距今已有 13 年，期间有许多专家和技术人员参加了这项工作，他们主要是中国国土资源航空物探遥感中心的王德发教授级高工、李新弟高工、张培琴高工、张永军高工、郑广如高工、邹为雷高工、乔春贵高工、乔广志工程师、梁秀娟高工、杨玲羽高工、万建华工程师、郭华工程师等；中国地质大学（北京）的安玉林教授、姚长利教授等，在此表示衷心的感谢！尤其要感谢中国国土资源航空物探遥感中心许多一直工作在中高山航磁测量一线的同志们，他们在实际工作中积累了大量的实际工作经验，为本书提供了“养料”，同时为我国中高山航磁工作的开展作出了重要贡献。

本书的完成，得到了中国国土资源航空物探遥感中心主任王平教授、周坚鑫教授级高工、范正国教授级高工、陈斌教授级高工、刘浩军教授级高工等的大力支持，在此表示衷心的感谢！

书稿动笔于 2006 年 12 月，历时两年，数易其稿，现将出版，希望能对推进我国航空物探事业有所裨益。限于著者水平，书中谬误之处在所难免，恳请关心本书的读者批评指正。

作 者
2009 年 4 月于北京

目 次

序 1	
序 2	
前 言	
第一章 概 论	1
第一节 中高山的概念	1
第二节 中国中高山区航磁测量概况	5
第三节 中高山航磁测量的主要问题	7
第四节 解决中高山航磁问题的基本思路	10
第二章 中高山区航磁测量方法技术	12
第一节 中高山区气候特点及航测飞行的危险因素	12
第二节 飞机选型	15
第三节 测量系统集成	26
第四节 测量比例尺	27
第五节 飞行高度	29
第六节 飞行方法	36
第七节 三维航迹辅助设计	41
第三章 中高山区航磁测量数据处理方法	49
第一节 航磁数据处理的一般流程	49
第二节 中高山区航磁数据处理的特殊要求	51
第三节 数字地形高程模型数据获取方法	53
第四节 航磁剖面异常高度改正方法研究	62
第四章 中高山区航磁数据成图方法	79
第一节 计算机绘彩色渐变平剖图方法	79
第二节 立体剖面图开发及其在异常解释中的应用	82
第五章 信息增强方法	91
第一节 中高山区航磁发现弱磁异常的可靠性分析	91
第二节 常规磁场弱信息异常提取方法	92
第三节 改进的非线性滤波方法	93
第四节 结构逻辑法和图形图像处理方法	96
第五节 小波变换提取剩余磁异常方法	100
第六节 小 结	103

第六章 测量面起伏条件下位场处理方法	104
第一节 概 述	104
第二节 频率域偶层位曲面位场处理及转换方法	105
第三节 理论模型试验结果	117
第四节 实际资料处理结果	131
第五节 曲面处理与平面常规处理的对比	136
第六节 小 结	139
第七章 测量面起伏条件下反演解释方法	141
第一节 测量面起伏条件下视磁化强度填图方法	141
第二节 测量面起伏条件下剖面半智能最优化反演方法	150
第三节 测量面起伏条件下三维最优化反演方法	155
第四节 小 结	161
第八章 以航磁资料为主的多源信息成矿定量预测方法	163
第一节 概 况	163
第二节 定量预测方法原理	164
第三节 基于 MapGIS 成矿预测方法	166
第四节 应用实例	166
第五节 小 结	176
第九章 结 语	177
High-Precision Aero-magnetic Survey in Medium-height Mountainous Areas (Abstract)	179
参考文献	182
参考资料	185

第一章 概 论

第一节 中高山的概念

一、中国的地势

我国是一个多山的国家，包括山地、高原和丘陵在内，广义的山地共占全国陆地总面积的三分之二。山地面积不仅广大，而且地势高峻。海拔高于 1000m 的山地和高原超过全国陆地总面积的一半，海拔超过 500m 的面积占全国陆地总面积的 84%。青藏高原及其周围的山脉，很多山峰的高度都超过 6000m。全世界 8000m 以上的 14 座高峰，全部坐落在青藏高原的喜马拉雅山和喀喇昆仑山上。我国地形复杂，高差也很显著，不仅有高达 8844m 的珠穆朗玛峰，还有低于海平面以下 155m 的艾丁湖。地势高差之大，为世界其他国家所罕见。

我国地形复杂多样，整体地势西高东低，大致呈三阶梯状分布（图 1-1-1）。

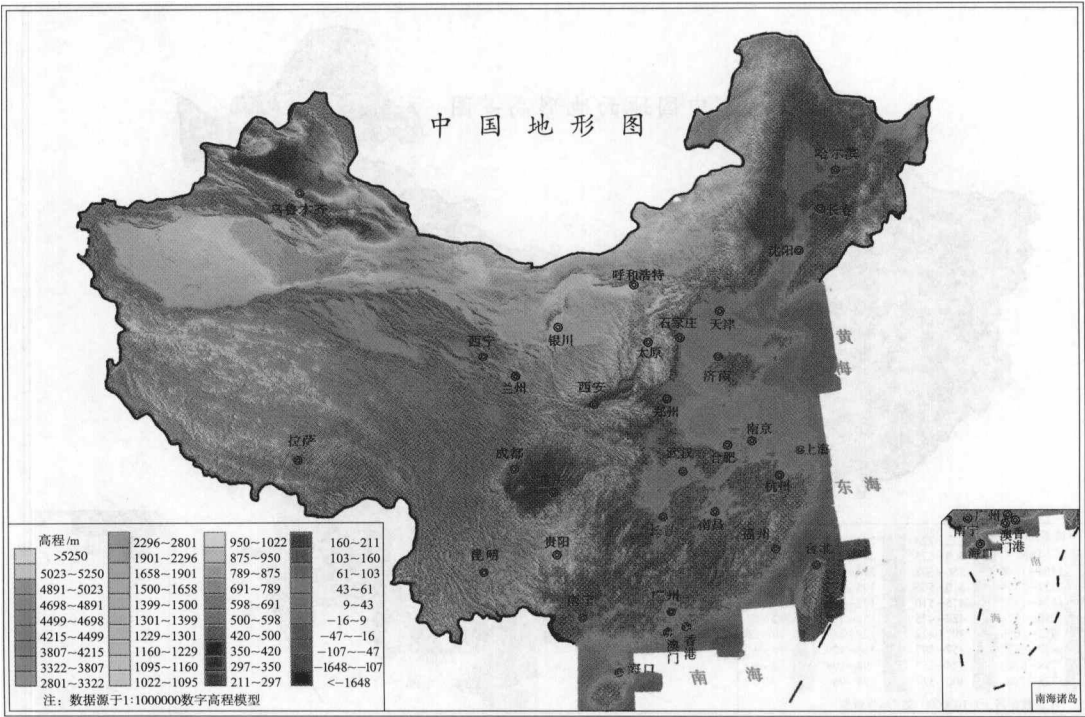


图 1-1-1 中国立体地势阴影图

青藏高原平均海拔在 4 000m 以上，面积达 $230 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是世界上最大高原之一，也是中国地形上最高一级的阶梯。其雄踞西南，在高原上横卧着一系列雪峰连绵的巨大山脉，有昆仑山脉、阿尔金山脉、祁连山脉、唐古拉山脉、喀喇昆仑山脉、冈底斯山脉和喜马拉雅山脉。

越过青藏高原北缘的昆仑山—祁连山和东缘的岷山—邛崃山—横断山一线，地势就迅速下降到海拔约 1000~2000m，局部地区可在 500m 以下，这便是第二级阶梯。它的东缘大致以大兴安岭至太行

山，经巫山向南至武陵山、雪峰山一线为界。这里分布着一系列海拔在 1500m 以上的高山、高原和盆地，有阿尔泰山脉、天山山脉、秦岭山脉，内蒙古高原、黄土高原、云贵高原，准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地和四川盆地等。

翻过大兴安岭至雪峰山一线，向东直到海岸，这里是一片海拔 500m 以下的丘陵和平原，它们是第三级阶梯。在这一阶梯里，自北而南分布有东北平原、华北平原和长江中下游平原；长江以南还有一片广阔的低山丘陵，一般统称为东南丘陵。前者海拔都在 200m 以下，后者海拔大多在 200~500m，只有少数山岭可以达到或超过千米。

据统计，中国的山地丘陵约占全国土地总面积的 43%，高原占 26%，盆地占 19%，平原占 12%。如果把高山、中山、低山、丘陵和崎岖不平的高原都包括在内，那么中国山区的面积要占全国土地总面积的三分之二以上。山区虽然不利于种植业的发展，也不利于交通运输以及经济文化的交流，但却埋藏着丰富的矿藏，生长着茂密的森林和有着珍贵的动、植物资源，它们是中国不可多得的宝贵财富。

二、中国的地形高差

参考（涂汉明 1990 年）中国地势起伏度和（封志明 2007 年）中国地形起伏度的研究结果，我们使用中国 1：100 万数字高程模型数据，以 10km×10km 栅格大小为单元，提取单元内地形高程最大值和最小值，两者相减，即为该单元地形高差值。在全国范围内，逐个网格单元进行计算地形高差，进而得出了中国地形高差值图（图 1-1-2）。

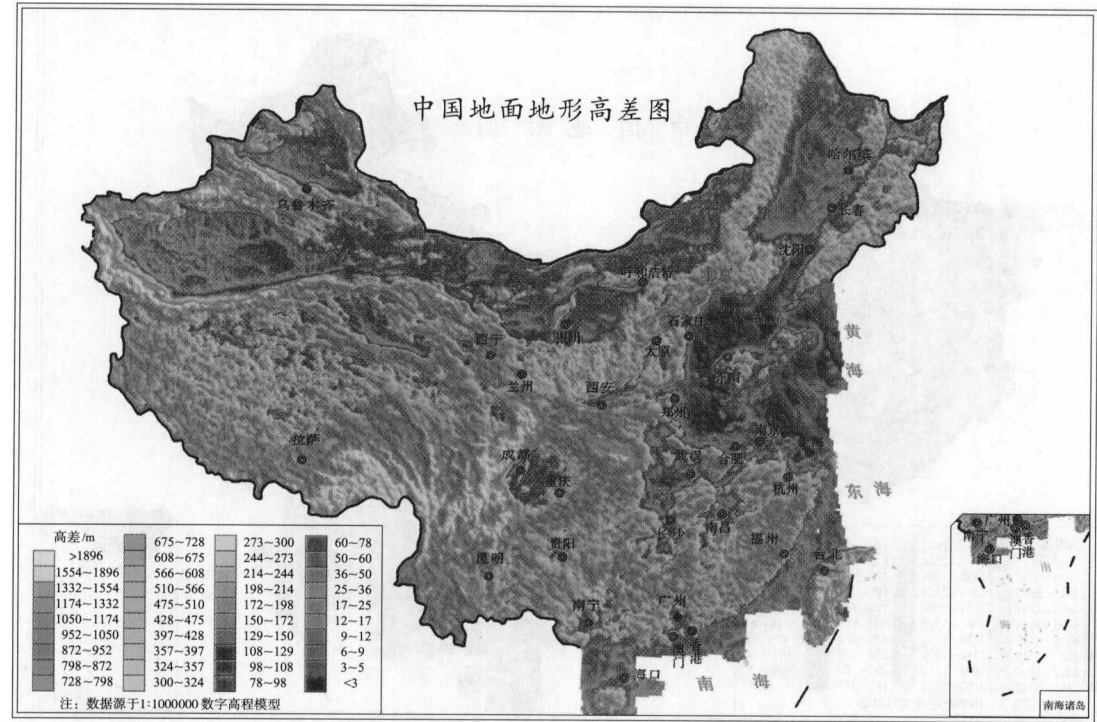


图 1-1-2 中国地形高差图

分析图 1-1-2 可知，中国地形高差空间分布整体趋势为西部高于东部，南部高于北部。最高值分布在藏东南—横断山区和天山地区，除一些巨大的盆地外，由此两处向两侧逐渐降低。最低值分布在东北平原、华北平原和塔里木盆地，四川盆地、内蒙古高原、江南地区、华南地区为次低值区域。

对比分析图 1-1-1 和图 1-1-2，不难看出我国地势在不同台阶上山地形起伏高差变化很大。位于第一地貌台阶——青藏高原边缘山地高差最大，绝大部分在 2500~3000m，甚至更大。自高原边缘向内山

地高差逐渐变小，在高原东部、中部的主要山脉高差降到 1000~2500m，高原腹部的长江、黄河河源地区和羌塘高原上的主要山地高差一般在 500~1000m，而在其间宽谷盆地的周围山地高差降到 200~500m 以下，地势起伏和缓。我国东部第三级地貌台阶，除中北部为宽阔的高差较小平原外，在东北部长白山地区、东南部大别山、南岭、武夷山山地高差仍较大，少数山地高差甚至超过 1000m（如武夷山等）。中间第二级的地貌台阶与第三级台阶相接的前缘山地，台阶内部的天山、阿尔泰山、秦岭、大巴山、贺兰山以及川西南和滇西地区大部分山地高差在 1000~2000m，在天山主脊高差甚至在 2500m 以上。其他地区除四川盆地、准噶尔盆地（部分地区）、呼伦贝尔盆地、吐鲁番盆地等盆地底部或其边缘山地高差在 500m 以下（不少地区小于 200m），其中塔里木盆地东缘—蒙古高原地形高差大多数在 200m 以下。

三、中高山的定义

对于中高山定义有两种不同的方案，其一是依据山地海拔高低分别称高山、中山、低山（沈玉昌，1959），其二是根据地形高差大小划分高山、中山、低山（柴宗新，1986）。

根据对中国地形地貌最新研究结果，李炳元（2008）认为中国共有 28 个基本地貌类型，其中山地类型 21 个（表 1-1-1）。这一命名既体现了我国从 20 世纪 50 年代以来以海拔高度划分的山地命名中已明确的极高山、亚高山、中山、低山，又包含了地形起伏（高差）差异。

表 1-1-1 中国山地基本地貌类型

海拔高程 山地（高差）	低海拔 (<1000m)	中海拔 (1000~2000m)	高中海拔 (2000~4000m)	高海拔 (4000~6000m)	极高海拔 (>6000m)
丘陵 (<200m)	低海拔丘陵	中海拔丘陵	高中海拔丘陵	高海拔丘陵	
小起伏山地 (200~500m)	小起伏山	小起伏中山	小起伏高中山	小起伏高山	
中起伏山地 (500~1000m)	中起伏低山	中起伏中山	中起伏高中山	中起伏高山	中起伏极高山
大起伏山地 (1000~2500m)		大起伏中山	大起伏高中山	大起伏高山	大起伏极高山
极大起伏山地 (>2500m)			极大起伏高中山	极大起伏高山	极大起伏极高山

注：此表是从李炳元（2008）地貌类型表中截取的山地地貌部分。

由于航磁测量工作的特殊性，中高山的定义要兼顾海拔高度和地形高差，前者与飞机适航性能有关，后者与飞行测量方法技术有关。在本书，我们将高差大于 500m，海拔高度大于 1000m 的起伏山地定义为中高山区。需说明的是这种划分法与我国航磁测量的传统划分方法略有区别。

中高山区在我国占有广大的面积，分布有各时代的岩浆岩、沉积岩和变质岩；大部分经过复杂的构造运动，存在大量的褶皱、断裂，至今仍有程度不等的升降运动；同时经受着复杂的外力作用，蕴藏着丰富的矿产资源。

按照这个标准，我国主要山脉区均为中高山区。根据山脉排列延伸方向，可以分为东西走向的山脉、南北走向的山脉、北东走向的山脉、弧形山脉、北西走向的山脉等几种类型。

（一）东西走向山脉

东西走向的山脉，是中国大陆上十分重要的山脉系统。除了十分明显的天山—阴山—燕山、中部

的昆仑山—秦岭—大别山及南部的南岭外，一般把西部地区其他一些雄伟高大的山脉，如喜马拉雅山、冈底斯山和喀喇昆仑山等，也归属于这一类型。

1. 天山

横贯新疆维吾尔自治区中部的天山将新疆分为南疆和北疆两个部分，即准噶尔和塔里木两大盆地。天山自西向东可分为三段：①伊犁盆地南北缘的哈尔克他乌山、济嘎郎山、雅布尔山、婆罗科努山等称为天山西段，海拔 3000~5000m。②额尔布特山、乌肯山、博格达山等称为天山中段，一般高度为 4000~4300m。③巴尔库山、哈尔里克山等为天山东段，海拔在 3000~4000m。天山雪线高度在 3500m 以上，有现代冰川分布。

2. 阴山

阴山位于内蒙古自治区中部偏南，实际上是天山山脉向东的延伸。阴山山脉比较复杂，海拔一般在 2000m 左右。西段称狼山，中段称乌拉山；东段为大青山（或称为中部），即狭义的阴山，构成阴山山脉的主体，雄伟、陡峭，环绕着河套平原，最高峰海拔 2338m。

3. 昆仑山

昆仑山成弧状环列在青藏高原的北缘，西起帕米尔，向东一直延伸到青海与四川盆地西北部后，与秦岭相接。昆仑山山脉平均海拔 5500~6000m，主峰公格尔山海拔 7719m。山地上部积雪终年不化，有现代冰川分布。

昆仑山可分为东西两段。①西段：介于西藏和新疆之间，山体呈北西—西方向延伸，南坡相对平缓，顶部比较平坦，7000m 以上的高峰数量不少，大多分布在西部。②东段：呈东西向延伸，由西面最高峰木孜塔格峰（海拔 6973m）开始分为三支：北支叫祁漫塔格山，再北部的阿尔金山支脉延伸至祁连山，成为青海高原和柴达木盆地界山，海拔一般也在 4000m 以上。中支是阿尔格山，南支是可可西里山，东延为巴颜喀拉山。

4. 秦岭

广义的秦岭包括好几条山脉，除秦岭本身外，还包括西起四川、甘肃交界的岷山，东面的伏牛山，南面的米仓山、大巴山和武当山等。西段高约 4000~5000m，东段降为 1000~2000m。

狭义的秦岭，仅指处于陕西境内的一段秦岭主体，相当于广义秦岭山脉的中段，海拔约在 2000~3000m，主峰太白山海拔 3767m。秦岭是华北地区与华中地区习惯分界线。

5. 南岭

我国南方最重要的东西走向山脉是南岭，它介于江西、湖南的南部与广东、广西的北部之间，海拔一般在 1000m 上下。南岭山脉主要由五岭组成，自西而东依次是：越城岭、都庞岭、萌渚岭、骑田岭和大庾岭。南岭山系大致也是中国华中和华南的地理分界线。

（二）南北走向山脉

南北走向的山脉主要有贺兰山、六盘山、横断山脉等。

宁夏回族自治区中部的贺兰山，海拔一般在 2000m 以上，最高峰海拔 3556m。宁夏南部和甘肃东部的六盘山，山地海拔一般在 2000m 以上，最高峰 2995m。广义的横断山脉，西起西藏东南部波密、察隅一带的伯舒拉岭和念青唐古拉山东南延伸部分，东到四川盆地西部边缘的邛崃山。狭义的横断山脉东界止于金沙江、云南境内的点苍山、元江一线。

（三）北东走向山脉

我国东部广大地区山地排列延伸方向大多呈北东—南西方向，按照它们分布的位置分为：西列山地、东列山地和台湾山地。

1) 西列北东走向山地包括大兴安岭、太行山、巫山和武陵山、雪峰山等。这一列山地东北起自黑

龙江的漠河，向西南延伸至湖南西部的新化—洞口一线以西；山地海拔不高，一般在 1000m 左右。其中大兴安岭是内蒙古高原与东北平原的界山，太行山是山西高原与华北平原的界山，巫山是四川盆地与长江中游平原的界山，雪峰山是两湖盆地（平原）与贵州高原之间的界山。西列北东走向山地以西，是我国高山、高原和大型盆地分布区，以东则是我国低山、丘陵和大平原之所在之处，也是我国阶梯状地势中第二级与第三级的分界线。

2) 东列北东走向山地包括长白山地、山东半岛低山丘陵、江南山地丘陵、东南沿海山地丘陵。

3) 台湾岛上的山地以玉山最雄伟高大，主峰玉山海拔 3997m，是我国东部地区最高峰。

（四）弧形山脉

位于中国西藏自治区和巴基斯坦、印度、尼泊尔、不丹境内的喜马拉雅山脉，向南凸出呈弧形，平均海拔在 6000m 左右，山势巍峨峭拔，雪峰重叠。它的主峰珠穆朗玛峰，突出于群峰之上，海拔约 8844m，为全球第一高峰。

（五）北西走向山脉

北西走向的山脉主要有阿尔泰山、祁连山和喀喇昆仑山。

阿尔泰山位于新疆维吾尔自治区北部，穿越中国、蒙古和哈萨克斯坦边境。它自西北向东南延伸，山地海拔 2000~3000m，最高峰友谊峰海拔 4374m。

祁连山位于青海与甘肃两省边境地区，是柴达木盆地、青海高原与河西走廊之间的山地的总称。山地自西北向东南倾斜，海拔一般在 4000~5000m，最高峰疏勒南山团结峰海拔 6305m。喀喇昆仑山位于新疆维吾尔自治区西南部和克什米尔东北部，山地海拔大部分在 6000m 上下，乔戈里峰海拔 8611m，为世界第二高峰。

第二节 中国中高山区航磁测量概况

一、中国航磁测量工作程度

航空物探开始于 20 世纪 30 年代。1936 年，苏联用旋转线圈感应式航磁仪进行航空物探，灵敏度约达 100nT。第二次世界大战中，美国发明了灵敏度近 1nT 的磁通门式航空磁力仪，在海上侦察敌国的潜艇，1946 年开始用于地质勘探。1948 年，加拿大首先试验航空放射性法成功，美国 and 英国同年也完成了类似的试验。1950 年，第一台航空电磁仪在加拿大试验成功。1955 年，瑞典和美国相继试验成功新类型的航空电磁仪，各种航空物探方法相继迅速发展。

中国航空物探开始于 1953 年，首先应用航空磁法，以后陆续增加了航空放射性、航空电磁、航空重力等方法，现在航空物探测量正向多参数、多分量的方向发展。

截至 2007 年，我国航空物探覆盖了约 $934 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的大陆国土和约 $210 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的海域面积，其中航空磁力测量（简称航磁，下同）已基本覆盖我国陆地和大部分海域，部分地区实现了多次覆盖，见表 1-2-1 和图 1-2-1。50 多年来，航磁工作为我国地质找矿作出了突出贡献。据不完全统计，全国共发现航空物探异常 4 万余处，直接或间接找到固体矿床 1100 余处，其中大中型固体矿床近 200 处；利用航磁查明了我国主要沉积盆地的范围、基底岩相、沉积层厚度和区域地质构造特征，发现郯城—庐江等深大断裂带，圈出局部构造 3500 余处，为大庆、渤海、塔里木、北部湾等油气田的发现作出了先期性贡献。2006 年，中国国土资源航空物探遥感中心（简称航遥中心，下同）利用自行研制的硬架式直升机高精度航磁测量系统，在湖北大冶铁矿开展了高分辨率航磁勘查（比例尺 1:1 万），依据航磁资料解释结果直接布钻见矿，为危机矿山深部找矿作出了重要贡献。

由图 1-2-1 可见，我国中西部地区未进行过大于 1:50 万比例尺的航磁测量。特别是天山山脉、

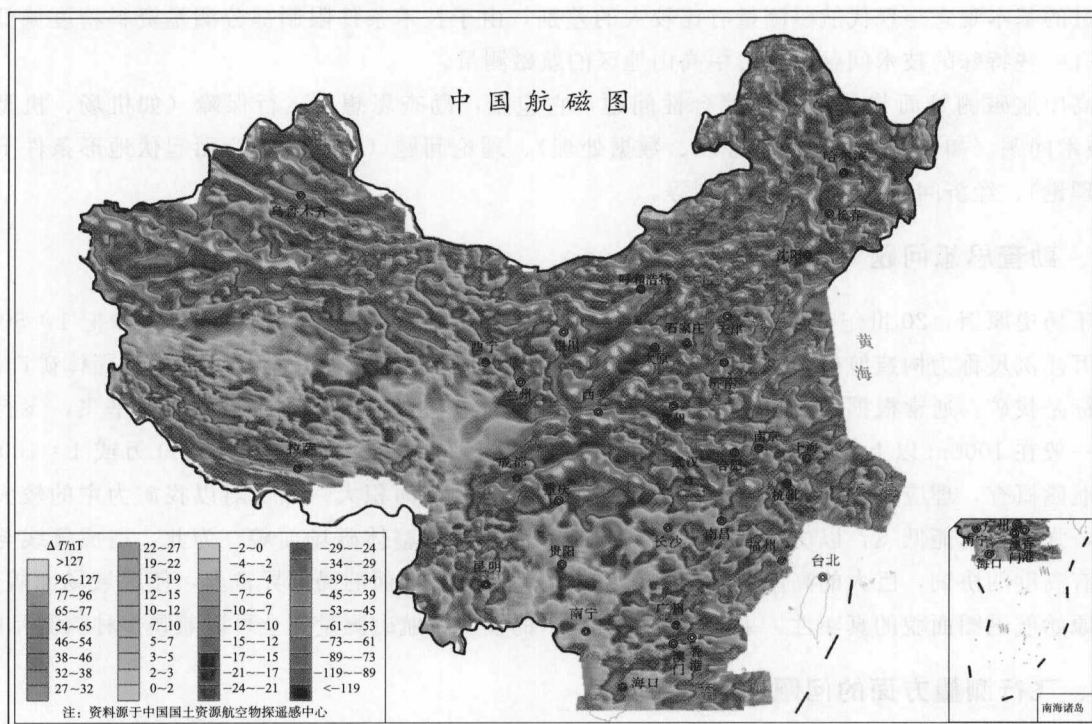


图 1-2-2 中国航磁图（截至 2007 年）

台湾省资料暂缺

二、中国中高山航磁测量现状

我国中高山地区航磁测量大致经过如下几个发展时期：

- 1) 20 世纪 50 年代后期（1957~1960 年），对东北大小兴安岭、长白山、内蒙古高原进行了 1:10 万~1:100 万的大规模调查。
- 2) 20 世纪 60 年代后期（1965~1970 年），普查重点向西向南推进，对内蒙古大青山、秦岭大巴山、甘肃北山、四川盆地、云贵高原等地进行了 1:5 万~1:100 万的大规模普查。
- 3) 20 世纪 70 年代后期到 80 年代初（1977~1984 年），普查重点继续向西南推进，这一时期天山、祁连山、四川西部、西藏东部、青海、塔里木、准噶尔纷纷纳入普查范围。
- 4) 20 世纪 80 年代中期到 90 年代中期，我国航磁测量基本上进入了以石油勘查为主的详查阶段，测量比例尺绝大部分在 1:2.5 万~1:10 万。中高山区航磁测量明显减少，仅在新疆北部阿勒泰、东天山开展过少量 1:2.5 万~1:10 万航磁、电磁、伽马能谱综合测量。

5) 20 世纪 90 年代末期以来，随着国家开发大西部战略的实施和地质找矿工作重点的西移，国家对西部中高山区航磁工作的需求量明显增大。1998 年开始实施的青藏高原中西部 1:100 万航磁概查工作，解决了一系列方法技术问题，并取得了丰富的地质调查成果。随后在西部开展 1:20 万航磁，测量面积约 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，部分地区开展了 1:5 万航磁，目前每年均布置有一定数量的航磁工作。

各个时期的航磁测量尽管测量方法和精度不同，但均为西部地质调查、矿产勘查、基础地质构造研究等提供了丰富的基础地球物理资料和解释成果，为开发西部作出了突出贡献。

第三节 中高山航磁测量的主要问题

回顾我国中高山地区航磁测量工作，尽管取得了丰富的成果，但也存在一些问题。主要表现在：