

doi: 10.11720/wtyht.2022.1076

李筱, 佟晶, 张婉, 等. 航空地球物理勘探在南极调查中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 12-21. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1076>

Li X, Tong J, Zhang W, et al. Application of airborne geophysical survey in antarctica[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 12-21. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1076>

航空地球物理勘探在南极调查中的应用

李筱^{1,2,3}, 佟晶¹, 张婉¹, 姚国涛¹, 张玄杰¹

(1. 中国自然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; 3. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083)

摘要: 航空地球物理勘探是认识极地区域构造的重要技术手段。在回顾和分析南极航空地球物理勘探发展历史与现状的基础上, 总结归纳了航空地球物理勘探在南极地区取得的主要成果。归纳出南极地壳结构研究、南极古大陆重建与恢复、南极火山与岩浆作用调查和南极冰架与地质相互作用研究等 4 方面典型实例, 航空地球物理勘探为南极地区地质构造研究提供了有效的技术支持。目前, 南极部分区域仍为航空地球物理勘探的空白区, 可将成功的经验应用于下一步的实际工作中, 特别是将航空重、磁方法与航空冰雷达探测方法相结合, 已成为解决南极冰层与基岩相互作用问题的未来趋势, 也为我国南极航空地球物理勘探提供了方向。

关键词: 航空物探; 南极; 地球物理调查现状; 地球物理应用

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0012-10

0 引言

南极具有极其丰富的矿产与油气资源, 南极冰盖稳定性也影响着全球气候与水平面变化, 开展南极地区地质调查工作具有重要的战略意义与科学价值。但是, 覆盖率超过 95% 的南极冰盖给南极调查工作带来了巨大阻碍。航空地球物理勘探方法(简称航空物探)能够克服恶劣的自然环境, 具有观测效率高、安全性高、成本低等特点, 在南极地区具有其他方法不可比拟的优势, 现已成为国际上开展南极区域调查的主要方法技术手段^[1-2]。我国在极地的航空地球物理调查才刚刚起步, 亟须加大对南极地质调查研究力度, 以确保未来我国在极地开发中的话语权。随着我国南极科考后勤保障能力不断加强, 开展大规模南极航空物探调查工作的条件日趋成熟, 采用国内自主技术进行航空物探调查势必将提到日程上来。

本文以大量文献和资料调研为基础, 回顾了南极航空物探调查的发展历史, 跟踪调研了航空物探

调查装备与技术现状, 归纳了各国应用航空物探方法在南极研究中取得的研究成果, 为我国在南极地区开展航空物探工作提供借鉴。

1 南极航空物探发展现状

1.1 南极航空物探发展历程

航空物探的发展大致可划分为 2 个阶段, 即独立调查阶段和联合调查阶段。

1.1.1 独立调查阶段

南极航空物探调查始于 1956 年, 苏联率先使用固定翼飞机获取了 Mimy 科考站附近的航磁数据。1980 年以后, 美国、澳大利亚、德国、印度以及日本等国都陆续在东南极开展了航磁调查。1988 年以后, 随着 GPS 定位技术的突破, 航空物探测量精度大幅度提高。

进入 20 世纪 90 年代, 世界主要发达国家不约而同地加快了南极航空物探调查速度。在此时期, 各国独立开展了大面积航磁调查, 测量比例尺达 1:100 万, 而航空重力与航空冰雷达测量方法使用较

收稿日期: 2021-02-09; 修回日期: 2021-05-10

基金项目: 自然资源部“航空地球物理与遥感地质重点实验室青年创新基金”(2020YFL27); 中国地质调查局公益性地质调查项目“雷琼东部海域航空物探调查”(DD20190210)

第一作者: 李筱(1991-), 男, 博士研究生, 研究方向为海洋地质。Email: 840491636@qq.com

少。仅 1995~2001 年间,以美国的 SOAR 测量计划为代表,各国共获取了近 39 万测线千米的航磁数据,局部测量比例尺达到 1:50 万,覆盖南极大部分海岸地区。

1.1.2 联合调查阶段

步入 21 世纪后,各国开始通过政府层面的协商,签订合作计划,互帮互助,合作共享,开展极地航空科考工作,填补南极地区航空物探数据的空白。主要合作计划有 AntGP(南极大地水准面计划)、AGAP(南极甘布采夫省计划)、ICECAP(南极中部板块冰冻圈演化调查研究计划)、IceBridge(两极冰川调查计划)、PolarGAP(极地冰盖调查计划)、ROSETTA-Ice(罗斯冰架调查计划)、RAE 61_Aero、WEGAS 以及 EAGLE 计划等^[3]。

1.2 极地航空飞行平台与测量仪器现状

1.2.1 测量飞行平台

由于南极气候环境复杂,航空物探调查工作多

限于在南极夏季开展,每年仅有近两个月的时间适于勘测。在南极地区开展航空物探工作,需要在短时间内获取尽可能多的数据,并且深入南极大陆以覆盖更多地区,因此对飞行平台性能要求较高。南极航空物探飞行主要选用固定翼型飞机作为主要平台,直升机仅适用于近科考站地区,无人机仍不成熟。为了适应极地飞行环境并搭载多种航空测量仪器,飞行平台需具有冰雪起降、航程远、载重大以及能在-40℃下工作等性能特点。世界上已有多个国家拥有极地航空调查专用的固定翼飞机,具有代表性的主要有我国与澳大利亚使用的 BT-67 机型、英美两国使用的双水獭(Twin Otter)DHC-6 机型、德国使用的多尼尔(Dornier)228 系列机型以及俄罗斯(苏联)使用的 IL-14 机型,其中 3 种机型的性能参数对比见表 1。

1.2.2 航空重力仪

随着卫星差分定位技术的发展,航空重力测量

表 1 极地航空物探固定翼平台性能参数对比

Table 1 Parameter comparison of polar airborne geophysical fixed-wing platform

飞行器参数	BT-67	Twin Otter	Dornier 228
总长/m	20.7	15.8	16.56
翼展/m	29.0	19.8	16.97
最大起飞质量/kg	13 000	5 670	6 600
可用载荷/kg	3 900	1 941	2 340
燃料储备量/kg	4 686	1 128	5 300
耗油量/(kg·h ⁻¹)	500	230	500
标准巡航速度/(km·h ⁻¹) (高度为 3810m 时)	380	265	315
最大飞行高度/m	7 600	8 137	8 535
最大续航里程/km	3 440	1 705	1 111
续航时间/h	~9	~5	10
引擎型号	PWC PT6A-67R	PWC PT6A-27	TPE-331-5-252D
发动机功率	1424SHP	652SHP	578HP
雪上或陆地上起降能力	轮子或轮子与雪橇结合	轮子、雪橇或轮子与雪橇结合	轮子、雪橇或轮子与雪橇结合
雪上起飞/降落滑行距离/m	760	360	790
飞行员数量	2	2	2

精度大幅度提高,具有比卫星重力数据更高的分辨率,能反映更细致的重力异常。各国使用不同的航空重力仪在极地进行了航空重力测量任务,目前在南极地区应用的航空重力测量系统主要有: Lacoste & Romberg S-83 海空重力仪,均方根误差可达 2.97 mGal; Sander Geophysics 地球物理公司的 AIRGrav 航空重力仪,数据均方根误差可达 1 mGal; Bell Aerospace 公司的 BGM-3 航空重力仪;俄罗斯研发的 GT-2A 航空重力仪,数据均方根误差可达 1 mGal。Studinger 等^[4]使用多个航空重力系统在南极同一

地区进行了对比测试,结果表明 GT-2A 有较好的稳定性和分辨率。

1.2.3 航空磁力仪

适用于极地航空磁力测量的磁力计主要为 Scintrex Cs-3 等磁力仪,灵敏度可达 0.6 pT。南极大陆冰层很厚,航磁观测面距离地表岩石较远,因此对磁力仪性能要求较高。不同于中、低纬度地区航磁测量,南极航磁测量在飞行过程中需要有效调整 Scintrex Cs-3 磁探头摆放的角度,以达到最佳测量效果。

1.2.4 航空电磁系统

航空电磁方法受限于冰层与电磁波能量的屏蔽作用,主要适用于无冰区与冰层较薄地区。在20世纪末,德国开展了南极航空电磁试验,测量了海上冰层厚度。目前已应用于南极测量的航空电磁系统主要有德国 Alfred Wegener 研究所(AWI)的直升机电磁(HEM-Bird)系统^[5], SkyTEM 公司的 SkyTEM504、SkyTEM312 航空电磁测量系统^[6-7]。SkyTEM312 是 SkyTEM 公司的最新型航空电磁测量系统,发射面积约 342 m²,具有短发射磁矩与长磁矩两种功能,最大探测深度可达 600~700 m。

我国已掌握与目前南极航空物探调查水平相当的测量装备与技术,但在飞行平台改装技术方面仍有差距。极地的自然地理条件和气象环境是对航空重、磁飞行的最大考验,我国国产飞机目前还未作为飞行平台在极地开展过测量工作,参照国际执行极地任务的飞行平台,目前国产运 12F 机型具备与其相当的性能,可作为备选机型进行冰雪起降试验。我国已掌握 GT-2A 航空重力仪的测量技术手段,在国内已实现大规模的生产测量应用,但值得注意的是,目前国内使用的 GT-2A 航空重力仪和 Scintrex 公司的 Cs-3 铯光泵磁力仪只适用于纬度小于 75°的地区,在极地应用时需要调整为极地模式。我国自主研发的 HC-2000 型 He 光泵磁力仪在极地地区可能更加适用,其在探头方向与磁感线夹角较小时信号最强,而国产航空重力仪已经在冰岛进行过测试飞行,取得了较好的效果。

1.3 极地现有航空重、磁数据情况

随着南极航空物探调查工作不断推进,数据共享成为各国合作的必然趋势,其中最具代表性的有 ADMAP 磁场数据库与 AntGG 重力数据库,这两套数据库分别汇总了南极现有航空、船以及卫星等多种手段采集的磁力与重力数据(图1)。

1.3.1 ADMAP 磁场数据库

ADMAP 计划始于 1995 年,在 SCAR 与 IAGA 两个组织的支持下,各国科学家通力合作汇编了南纬 60°以南已有的航空、船测以及卫星测磁力数据。1995~2007 年形成了第一阶段的磁力数据库,2008~2018 年完成了第二阶段磁力数据库。截至目前,已经汇编整理了近 350 万测线千米的航磁与船磁数据,几乎覆盖整个南极(图 1b)。汇编工作先将所有数据处理成网格数据,分别通过插值与滤波方法去除所有测线中的数据间隙、尖刺;在系统差分基础上进行统一调平,最终将航磁与船磁数据汇编为间距 1.5 km 的网格数据;最后,进行了波长大于 7 km 的低通滤波,得到 ADMAP-2 数据库^[8]。目前,ADMAP 计划正在谋划第三阶段工作(ADMAP-3),计划汇编自 2012~2019 年美、德、英、俄、中等国采集的近 546 万测线千米数据。

1.3.2 AntGG 重力场数据库

AntGG 计划收集了南极重力数据^[9],以 2007/2008 国际极地年期间获得的航空重力数据为主,加入了 IceBridge 计划和德国在毛德皇后地获取的航空重力数据,形成了 AntGG 南极重力数据库。目前

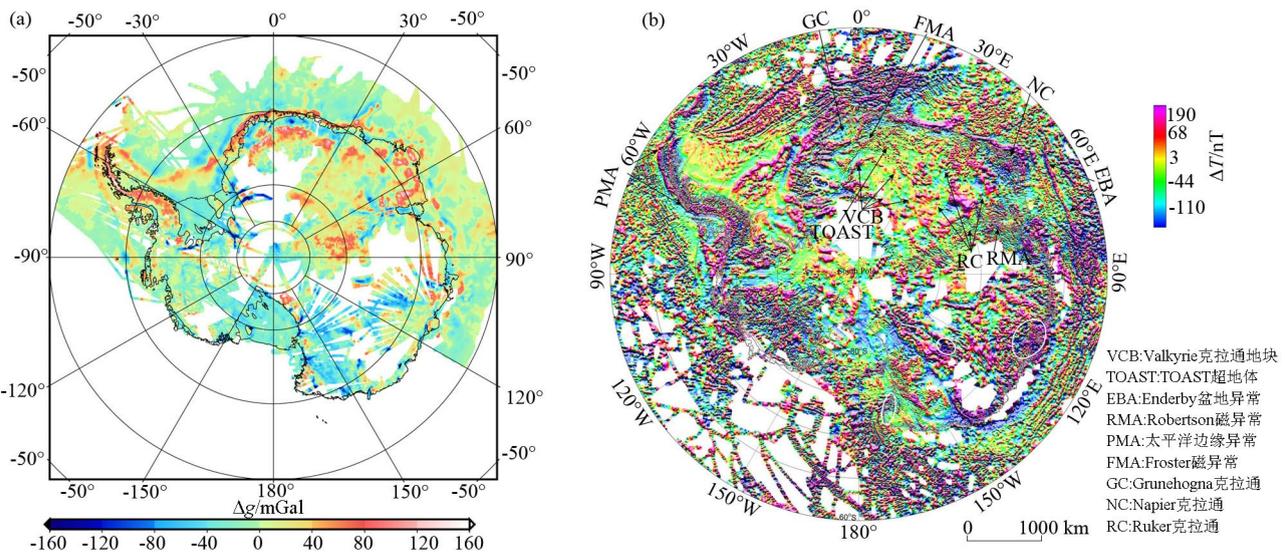


图1 南极地球物理数据覆盖情况^[7-8]

Fig.1 Field geophysical data covering over Antarctica^[7-8]

该数据库汇编了超过 1 300 万个数据点,覆盖面积达 1 000 万 km²,近南极陆地覆盖率达到 73%,南极海域覆盖率达到 29%。

目前,南极航空物探调查仍处于填补数据空白的阶段,其中西南极数据覆盖率最高,测量比例尺达到 1:50 万。由于补给条件困难等原因,先期调查主要覆盖了科考站附近与南极大陆海岸带,南极极点周边、伊丽莎白公主地、南极横断山等地区仍存在大量航空物探数据空白,将是未来南极航空重、磁测量的主要目标区域。近年来,航空重、磁测量逐步从小比例尺、低精度发展为大比例尺、高精度测量。各国针对具体调查目标也开始在重点调查区域部署高精度、大比例尺航空重、磁测量,这也是未来南极航空物探调查的主要方面。

2 极地航空物探应用现状

南极处在超大陆地质演化的核心区域,包含着古大陆重建的重要线索,然而,恶劣的自然环境与覆盖率达到 99% 以上的冰雪层,为南极地质调查与研究带来了巨大困难,阻碍了南极地质演化的认识。21 世纪以来,西方发达国家通过开展南极航空物探调查取得了一系列成果,主要体现在南极地壳结构、古大陆重建与恢复、岩浆与火山活动以及南极地质与冰层相互作用等前沿科学问题的研究上。

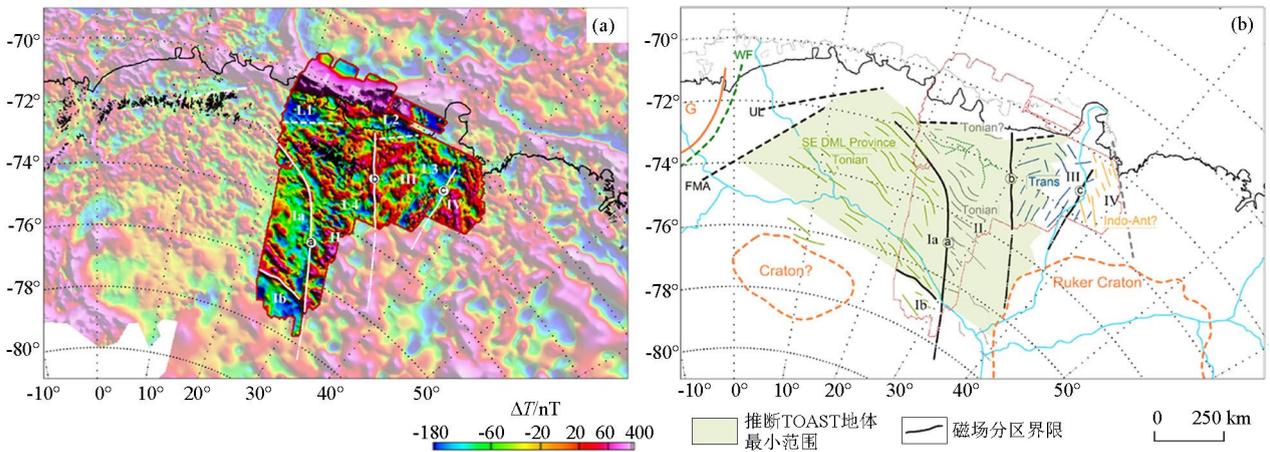
2.1 南极地壳结构研究问题

地壳是大陆岩石圈的重要组成部分,地壳厚度、结晶基底界面以及深大断裂系统等是表征地壳岩石圈结构构造主要参数,横跨海陆的航空重、磁数据反映了地壳结构与深部构造,是我们认识南极大陆区

域构造演化历史的重要媒介。

南极半岛长期以来被认为是古太平洋与冈瓦纳大陆的俯冲带。通过西南极航空重、磁调查,发现了一个近 1 500 km 长的弧形航磁异常带,被命名为 PMA,可能为多个弧形异常叠加而来。据航磁资料推测,南极半岛可能是一个岛弧复合块体^[10-11],由 2 个岩浆弧拼合而成,其间保存着近 1 500 km 长的缝合线。PMA 两侧的块体航空重、磁场特征存在差异明显,表明两侧地壳成分明显不同,分别为古太平洋和冈瓦纳大陆块体;沿俯冲带的航空重、磁场横向存在差异,揭示了俯冲带不同部位存在着差异性拼合。Jordan T A 等通过位于该俯冲带中部 Adelaide 岛的大比例尺航空重、磁数据,反演得到了 Adelaide 中生代岛弧的三维结构^[12],结合地表露头测年证据,认为该岛弧在古近纪停止俯冲;俯冲带北部 Anvers 岛的航磁异常特征表明,一些微小块体在俯冲过程中消亡^[13]。

航空重、磁数据可以作为确定地体边界与划定地体展布的依据。南极大陆作为冈瓦纳大陆的主体,保存了众多组成冈瓦纳大陆的地体,这些地体之间的接触缝合线位置仍不清楚。最新的航空重、磁异常特征为划定其间各地体边界提供了依据。前人对毛德皇后地东部的 TOAST 地体进行了大量研究,通过地质年代学和地球化学分析确认了该地体是拉伸纪(1 000~850 Ma)形成的海洋弧形地体^[14],认为其与劳亚古陆重新聚合、冈瓦纳大陆形成有关,但其平面展布范围仍未被完整揭示。德国 AWI 研究中心 Ruppe 等基于最新的航空重、磁数据,进一步厘定了 TOAST 的平面展布范围(图 2)^[15],认为其大小与南极半岛相当。TOAST 地体的航磁特征表现



a—TOAST 地体的航磁异常;b—TOAST 地体范围

a—aeromagnetic anomaly over TOAST;b—the range of TOAST

图 2 TOAST 地体的航磁异常与平面范围^[15]

Fig.2 Aeromagnetic anomaly and geological structure character of TOAST^[15]

为多个弧形条带状航磁异常,具有 NW—SE 向延伸趋势,表明其可能由两个或多个的弧形地体拼合组成。目前受限于数据空白,其南部边界仍不清楚。

基于航空重力数据,可以反演得到地壳厚度模型,反映南极各地区的岩石圈厚度变化,为划分基底构造单元提供依据。Jordan T A 等基于 Wilkes 盆地的航空重、磁数据,进行了地壳厚度反演^[16],结果表明该盆地南北地壳厚度差近 15 km,认为后期伸展

作用对盆地北侧产生了重要影响。Davis 等使用重、磁、震联合反演方法描述了南极东部海域 Enderby 盆地地壳形态^[17]。在盆地东、中、西 3 段分别选取典型剖面反演(图 3),结果显示盆地由东向西地壳厚度逐渐减小,火山岩的发育也逐渐减弱,推断东冈瓦纳大陆裂解过程中,地壳变形和海底扩张程度沿裂谷走向存在差异。

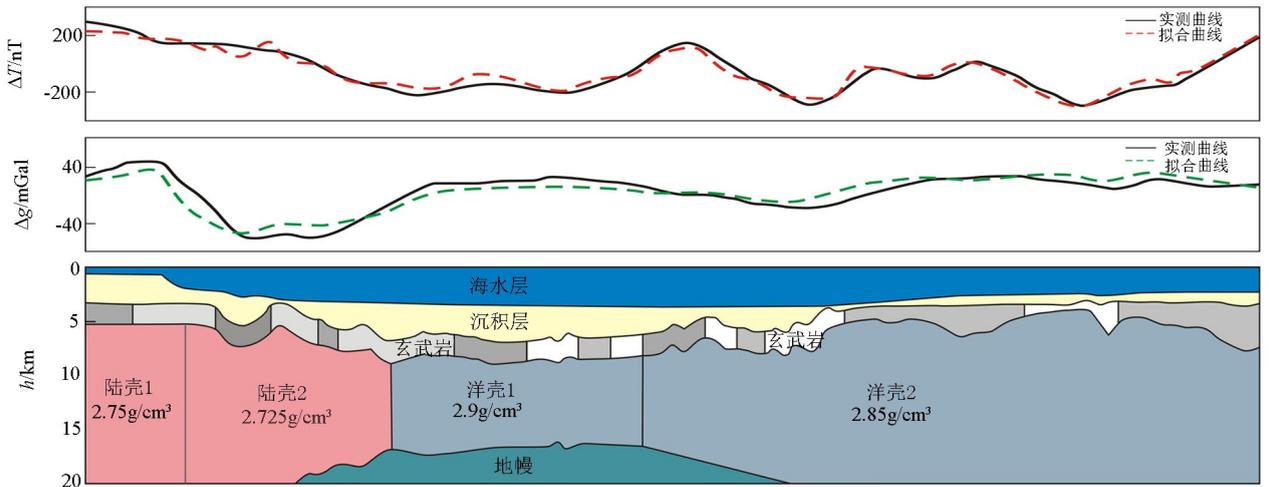


图 3 Enderby 盆地东部重、磁震联合反演剖面^[17]

Fig.3 Aeromagnetic and gravity fitting inversion profile in the eastern Enderby basin and its crustal structure interpretation^[17]

2.2 古大陆重建与恢复

南极大陆是冈瓦纳古陆的核心^[18],也是现今唯一与所有南半球大陆(南美洲、非洲、马达加斯加岛、印度、澳大利亚以及新西兰)有共同边界的古陆^[19],因此,确定超大陆裂解与拼合过程中断裂的对应关系、恢复板块间的相对位置关系是南极地质演化研究中的关键科学问题。大量研究成果表明,将航空重、磁数据与地质年代学、地球化学和古地磁数据结合起来,可以作为重建冈瓦纳、罗迪尼亚和哥伦比亚超大陆的重要依据^[20]。

东南极的毛德皇后地(Dronning Maud Land)记录了东南极 Grunehogna 克拉通与非洲 Kaapvaal 克拉通之间的相对古位置信息。以往重建东南极与非洲相对古位置都是基于两大陆之间的扩张洋中脊的磁异常条带数据,而最新的航磁数据覆盖了两侧陆域,为重建东南极与非洲古位置提供了进一步约束。Riedel 等^[21]以 Leinweber 和 Jokat^[22]发表的东南极与非洲古大陆重建模型为基础,使用 G-Plates 软件将东南极与非洲板块进行旋转拼合,恢复后的两个板块上典型磁异常特征走向、位置以及大小都表现出较好的一致性。拼合后,两个大陆的深部断裂构

造也可以很好地对应起来,进一步说明航磁数据可以应用于古大陆重建。

Aitken 等^[23]基于 ICECAP 项目采集的航空重、磁数据,恢复了南极 Wilkes 地与澳大利亚近南极侧的相对古位置。依据 Williams 等^[24]建立的 Leeuwin 古大陆模型,Aitken 等将两个大陆的航磁异常与剩余均衡重力异常拼合起来,重建冈瓦纳大陆裂解前的重、磁异常图,形成古冈瓦纳大陆拼合模型(图 4)。拼合后模型显示两个大陆保存了许多相似结构,两个大陆上有磁性的花岗岩有着相似的重、磁场特征,其间的重要缝合带可以很好地连接起来。基于拼合后模型的重、磁异常对比结果,修正了前人的南极与南澳大利亚古大陆重建模型。

2.3 南极火山与岩浆作用

火山与岩浆活动伴随着板块俯冲、拼合及大陆裂解过程,广泛分布于广袤的南极大陆。火山与岩浆活动记录了板块运动过程,也影响着冰架下热流分布,因而揭示南极冰架下的南极火山与侵入岩体展布等特征一直是南极研究的热点科学问题。航空物探调查为研究南极冰下岩浆与火山作用提供了重要信息。

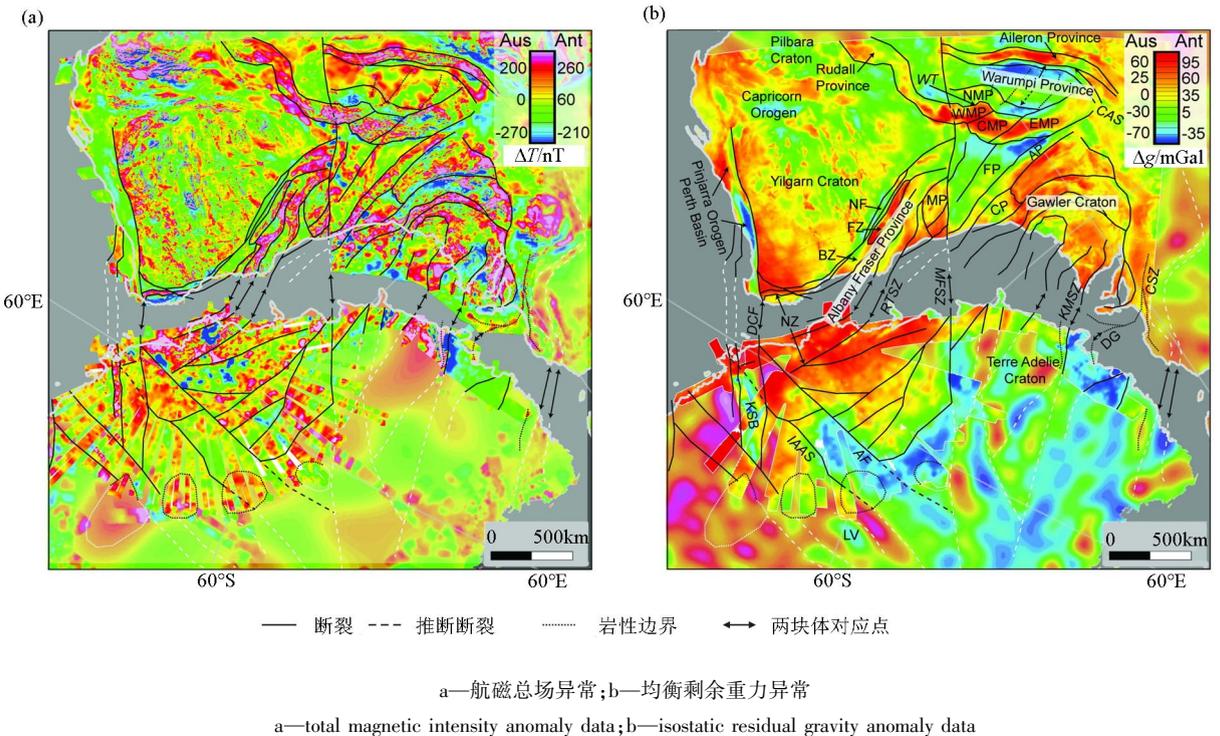


图 4 基于 Leeuwin 模型恢复^[24]的 160 Ma 冈瓦纳大陆南极 Wilkes 地与澳大利亚近南极侧古大陆对比重建图^[23]

Fig.4 Reconstruction of Gondwana fit at 160 Ma^[23] based on the Leeuwin model^[24]

Vries 等^[25]使用形态分析方法研究了航空冰雷达测得的冰层厚度数据,在已知火山口的位置约束下结合航空重、磁数据,建立了西南极火山口的航空重、磁识别标志,并据此推测出西南极存在 138 座冰下火山^[25],其中 91 座为新发现火山口。其研究表明,火山口在冰雷达数据剖面中表现为直径不超过 5 km 的锥形,同时具有环状磁异常特征,识别出的火山口多沿西南极裂谷带展布,分布密度达到约每 18 500 km² 分布 1 座火山。此外,基于航空重、磁数据还可以建立火山内部结构模型。南极半岛北部詹姆斯—罗斯岛哈丁顿火山是一座复式火山,自中新世至今持续喷发,但受到冰层覆盖,对于该火山的演化过程认识较少。Jordan T A 等^[26]基于航空重力数据,建立了该火山的三维结构模型。认为该火山对应布格重力正异常,可能由一个埋藏较浅的低密度体引起,推测为火山灰充填了火山口,需要进一步验证;Ghidella^[27]通过该区域的航磁资料,分析得到了该火山喷发碱性火山岩的分布范围,反演得到多个向下延伸约 3 km 的近垂直高磁化率异常体,认为该火山存在多个喷发中心与岩浆通道。

在冈瓦纳大陆裂解过程中,南极大陆爆发了大规模的岩浆活动,形成了 Karoo-Ferrar 大火成岩省。为了探明与 Karoo-Ferrar 大火成岩省相关的侵入岩体展布,英国南极调查局开展了多次航空物探调查。

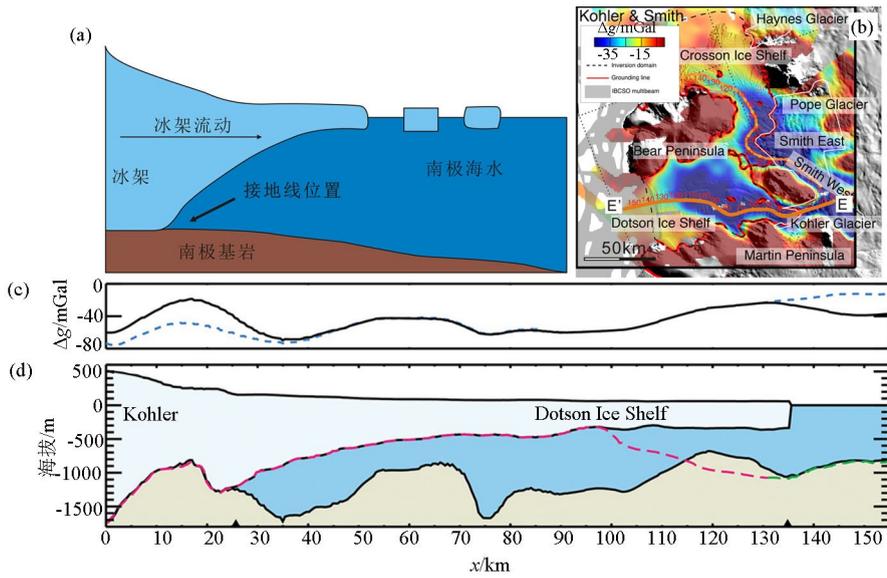
Jordan T A 等^[28]依据航空重、磁数据,在东南极 Coats 地区发现了一个航空布格重力异常大于 50 mGal,航磁异常大于 1 000 nT 的长 80 km、宽 30 km 的异常体。通过重、磁联合反演,推测该异常可能为高密度、高磁化率的辉长岩体,认为其形成于冈瓦纳大陆裂解过程中,与下地幔岩浆活动有关。

2.4 南极地质与冰盖之间的相互作用研究

2.4.1 南极冰下地形与地貌研究

长期的遥感观测发现,海水对于冰架的侵蚀是引起冰架减少的重要原因。接地线是指海水与冰架相互作用发生的位置,接地线变化表明冰架物质增加或者减少,是冰川变化与海平面变化的重要指示器。南极海岸带地形条件复杂,很难对接地线进行直接观测,通过卫星遥感或其他间接方法也很难获得准确的海岸带地形数据。高精度航空重力测量为南极海岸带地形测量提供了有效解决方案。

针对两极海洋与冰架强烈交互地区,美欧国家有针对性地开展航空物探调查 Operation Ice-Bridge 计划,测量两极消融较快冰架区域的冰下地形。美国加州大学 Romain Millan 等^[29]基于航空重力异常数据,首次在 Crosson 和 Dotson 冰架下发现了向内陆延伸的冰下峡谷(图 5),南大洋温暖海水沿冰下峡谷内流侵蚀冰架,加速了冰川溶解。Operation IceBridge 计划获得的地形数据还发现,不同地



a—南极沿岸冰架接地线示意;b—阿蒙德森海沿岸航空重力异常;c—航空重力数据观测曲线与反演拟合计算曲线;d—基于航空重力数据反演得到的 Dotson 冰架冰下 E-E'剖面地形(粉色为 MBES 测量数据,黑色为重力反演结果曲线)

a—grounding line model in Antarctic coastal ice shelf;b—free-air gravity anomalies in Dotson Ice Shelf;c—the observed and calculated airborne gravity anomaly;d—inverted surface topography of Dotson Ice Shelf E-E'profile based on airborne gravity data

图 5 基于航空重力数据反演得到的 Dotson 冰架冰下地形^[29]

Fig.5 Basement surface topography under Dotson Ice inverted by airborne gravity data^[29]

形条件对冰架稳定性的影响不同。Thwaites 冰下地形外高内低,导致海水易向内陆流动,使得冰川快速溶解;而在南极半岛,Constantino 等^[30]基于南极半岛航空重力数据反演得到的冰下地形结果表明,南极半岛存在沿岸山脊阻挡了海水内流,因而南极半岛冰架更加稳定。

2.4.2 南极地热通量计算

南极地热通量是南极岩石圈的重要动力学边界条件,影响南极冰盖温度和岩石圈流变性质。但南极地热通量无法直接观测,仅可以通过低分辨率的卫星磁测数据、地震数据以及靠近各国科考站的零星钻井数据进行间接计算。

Martos 等^[31]基于 ADMAP 磁场数据库,反演得到南极居里面深度,依据热力学模型估算南极全区地表地热通量分布(图 6)。该结果将原有地热通量分布图精度提高了近 50%。研究表明,全南极地热通量值大致为 42~180 mW/m²,平均值为 68 mW/m²,与全球大陆地热通量平均值基本相当。高地热通量值异常主要位于西南极裂谷与南极半岛附近,最大值近 170 mW/m²;东南极的地热通量值整体较低,由沿岸向中心逐渐变小。

2020 年,Johnson A B 等^[32]联合多个科学家发布了南极地热通量研究白皮书,系统介绍了目前的南极地热通量研究方法,指出了各类方法的优缺点。

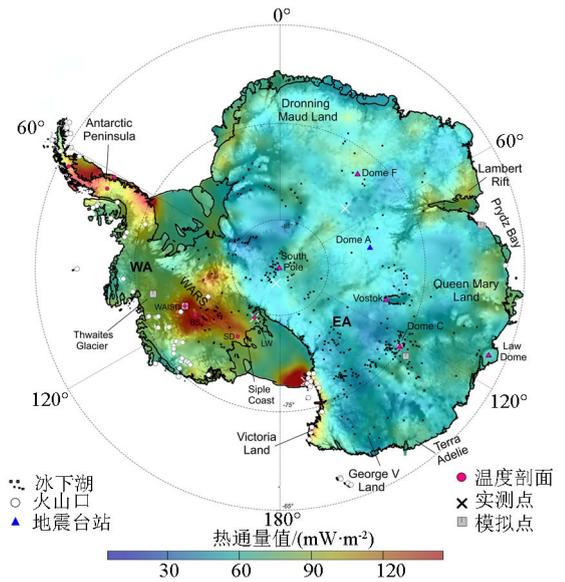


图 6 南极地热通量分布^[33](底图为南极冰下地形)

Fig.6 Geothermal heat flux distribution at the ice-rock^[33]
(interface superimposed on subglacial topography)

不同的岩石圈与地幔的结构模型和岩石物理性质,得到的南极地热通量结果有很大差异,因此需要更多钻井与地质露头以及地幔包体等提供的地热通量值约束,并综合多源数据建立更加精确的南极壳幔结构模型。

2.4.3 航空电磁方法揭示海冰厚度与地下水分布

目前应用航空电磁方法在南极开展的调查工作

还相对较少,主要以试验性测试为主。Pfaffling 等^[33]2003 年使用德国 AWI 研究所研制的直升机频率域电磁系统进行了海上浮冰厚度测量,最大可探测厚度达 3 m,测量结果与海冰直流电阻率原位测量方法得到的结果基本一致^[34]。在美国国家自然科学基金会资助下,Mikucki J A 等实施了 ANTAEM 计划,先后于 2011 年与 2018 年在南极罗斯海沿岸 Taylor 峡谷进行了两次航空电磁试验性测量,旨在

调查南极冻土层厚度与地下水分布。两次测量均使用了 SKYTEM 公司仪器,获得的航空电磁数据反演结果很好地显示了地下电阻率结构^[6,35]。以钻井资料为约束的反演结果表明,该区冻土层厚约 300~400 m,具有较高电阻率。同时,调查发现测区范围内地下存在低阻层,认为是地下水和冰下湖以及地表水系相连的通道(图 7)。该项调查为航空电磁法在极地开展类似工作提供了较好的示范。

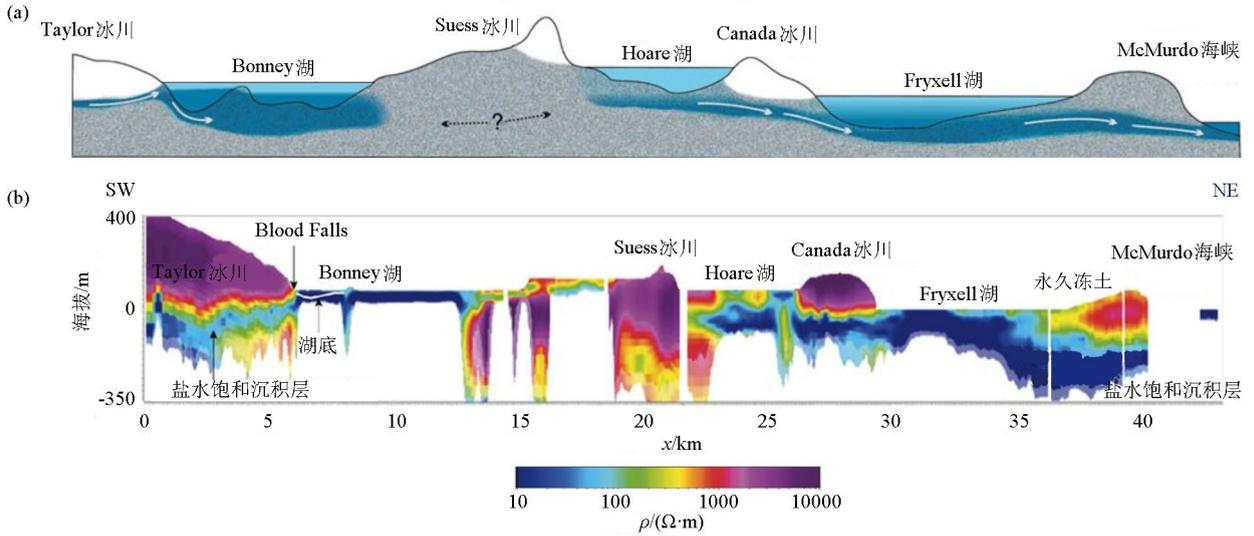


图 7 Taylor 峡谷电阻率反演成果 (a) 与地下水流解释模式 (b)^[6]

Fig.7 Resistivity cross-section for the length of the Taylor Valley (a) and conceptual diagram depicting predicted hydrological connectivity (b)^[6]

3 结语与建议

1) 南极地壳结构研究、南极古大陆重建与恢复、南极火山与岩浆作用调查和南极冰架与地质相互作用研究等典型实例表明,航空地球物理勘探是解决南极区域地质构造问题的有效技术手段。

2) 目前,南极航空地球物理勘探处于填补数据空白和重点区域高精度中大比例尺测量阶段,具有向南极大陆内部探测的发展趋势。关于南极超大陆聚散过程中涉及的演化过程、古太平洋俯冲带特征和新生代裂谷等问题,已成为南极地质研究的焦点,可作为我国下一步南极航空地球物理勘探的重点。

3) 航空重、磁方法与航空冰雷达探测方法的结合,能够提升南极冰下地质的准确性,是解决南极冰层与基岩相互作用问题的重要手段,可作为我国南极航空地球物理勘探的新方向。

参考文献 (References):

[1] Weihaupt J G, Rice A, Van d H F G. Gravity anomalies of the

- Antarctic lithosphere [J]. *Lithosphere*, 2010, 2(6): 454–461.
- [2] Johnson A C, Frese R R B V, Group A W. Magnetic map will define Antarctica's structure [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 78(18): 185–185.
- [3] 高晟俊,郝卫峰,李斐,等.极地航空重力测量及其应用进展 [J]. *极地研究*, 2018, 30(1): 97–113.
- Gao S J, Hao W F, Li F, et al. Progress in application of airborne gravity measurements in polar regions [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2018, 30(1): 97–113.
- [4] Studinger M, Bell R, Frearson N. Comparison of AIRGrav and GT-1A airborne gravimeters for research applications [J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): 151–161.
- [5] Pfaffling A, Reid J E. Sea ice as an evaluation target for HEM modelling and inversion [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 67(3): 242–249.
- [6] Mikucki J, Auken E, Tulaczyk S, et al. Deep groundwater and potential subsurface habitats beneath an Antarctic dry valley [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6831.
- [7] Foley N, Tulaczyk S M, Grombacher D, et al. Evidence for pathways of concentrated submarine groundwater discharge in East Antarctica from helicopter-borne electrical resistivity measurements [J]. *Hydrology*, 2019, 6(2): 1–15, 54.
- [8] Golynsky A V, Ferraccioli F, Hong J K, et al. New magnetic anomaly map of the Antarctic [J]. *Geophysical Research Letters*,

- 2018, 45(13): 6437–6449.
- [9] Scheinert M, Ferraccioli F, et al. New Antarctic gravity anomaly grid for enhanced geodetic and geophysical studies in Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(2): 600–610.
- [10] Jordan T A, Riley T R, Siddoway C S. The geological history and evolution of West Antarctica [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(2): 1–17.
- [11] Artemieva I M, Thybo H. Continent size revisited: Geophysical evidence for West Antarctica as a back-arc system [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103106.
- [12] Jordan T A, Neale R F, Leat P T, et al. Structure and evolution of Cenozoic arc magmatism on the Antarctic Peninsula: A high resolution aeromagnetic perspective [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(3): 1758–1774.
- [13] Bakhmutov Y V. Crustal structure of the Antarctic Peninsula sector of the Gondwana margin around Anvers Island from geophysical data [J]. *Tectonophysics*, 2013, 585: 77–89.
- [14] Elburg M, Jacobs J, Andersen T, et al. Early Neoproterozoic metagabbro-tonalite-trondh-jemite of Sr Rondane (East Antarctica): Implications for supercontinent assembly [J]. *Precambrian Research*, 2015, 259: 189–206.
- [15] Ruppel A, Jacobs J, Eagles G, et al. New geophysical data from a key region in East Antarctica: Estimates for the spatial extent of the Tonian Oceanic Arc Super Terrane (TOAST) [J]. *Gondwana Research: International Geoscience Journal*, 2018, 59: 97–107.
- [16] Jordan T A, Ferraccioli F, Armadillo E, et al. Crustal architecture of the Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica, as revealed from airborne gravity data [J]. *Tectonophysics*, 2013, 585: 196–206.
- [17] Davis J K, Lawver L A, Norton I O, et al. The crustal structure of the Enderby Basin, East Antarctica [J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40: 1–16.
- [18] 牛雄伟, 高金耀, 吴招才, 等. 南极洲普里兹湾石圈各向异性: 海底地震仪观测 [J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1950–1958.
Niu X W, Gao J Y, Wu Z C, et al. Lithosphere anisotropy of Prydz Bay, Antarctica: From ocean bottom seismometer long term observation [J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1950–1958.
- [19] Dunkley D J, Hokada T. Geological subdivision of the Lützow-Holm Complex in East Antarctica: From the Neoproterozoic to the Neoproterozoic [J]. *Polar Science*, 2020, 26: 100606.
- [20] Ebbing J, Dilixiati Y, Haas P, et al. East Antarctica magnetically linked to its ancient neighbours in Gondwana [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5513.
- [21] Riedel S, Jacobs J, Jokat W. Interpretation of new regional aeromagnetic data over Dronning Maud Land (East Antarctica) [J]. *Tectonophysics*, 2013, 585: 161–171.
- [22] Leinweber V T, Jokat W. The Jurassic history of the Africa-Antarctica corridor — new constraints from magnetic data on the conjugate continental margins [J]. *Tectonophysics*, 2012, 530–531: 87–101.
- [23] Aitken A R A, Betts P G, Young D A, et al. The Australo-Antarctic Columbia to Gondwana transition [J]. *Gondwana Research*, 2016, 29: 136–152.
- [24] Williams S E, Whittaker J M, Müller R D. Full-fit, palinspastic reconstruction of the conjugate Australian-Antarctic margins [J]. *Tectonics*, 2011, 30, TC6012: 1–21.
- [25] Van Wyk de Vries, M, Bingham R G, et al. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2017: 461(1): 231–248.
- [26] Jordan T A, Ferraccioli F, Jones P C, et al. Airborne gravity reveals interior of antarctic volcano [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 175(3–4): 127–136.
- [27] Ghidella M E, Zambrano O M, Ferraccioli F, et al. Analysis of James Ross Island volcanic complex and sedimentary basin based on high-resolution aeromagnetic data [J]. *Tectonophysics*, 2013, 585: 90–101.
- [28] Jordan T A, David B. Investigating the distribution of magmatism at the onset of Gondwana breakup with novel strapdown gravity and aeromagnetic data [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2018, 282: 77–88.
- [29] Millan R, Bignon E, Bernier V, et al. Bathymetry of the Amundsen Sea Embayment sector of West Antarctica from Operation Ice-Bridge gravity and other data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(3): 1360–1368.
- [30] Constantino R R, Tinto K J, Bell R E, et al. Seafloor Depth of George VI Sound, Antarctic Peninsula, From Inversion of Aerogravity Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(21): 1–10.
- [31] Martos Y M, Catalan M, Jordan T A, et al. Heat flux distribution of Antarctica unveiled [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(22): 11417–11426.
- [32] Burton J A, Dziadek R, Martin C. Geothermal heat flow in Antarctica: Current and future directions [J]. *Cryosphere Discussions*, 2020, 14(11): 3843–3873.
- [33] Pfaffling A C, Haas, Reid J E. Empirical processing of HEM data for sea ice thickness mapping [C]//10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Extended Abstracts, 2004.
- [34] Reid J E, Pfaffling A, Worby A P, et al. In situ measurements of the direct-current conductivity of Antarctic sea ice: Implications for airborne electromagnetic sounding of sea-ice thickness [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 44(7): 217–223.
- [35] Foley N, Tulaczyk S M, Grombacher D, et al. Evidence for pathways of concentrated submarine groundwater discharge in East Antarctica from helicopter-borne electrical resistivity measurements [J]. *Hydrology*, 2019, 6(2): 54.

Application of airborne geophysical survey in antarctica

LI Xiao^{1,2,3}, TONG Jing¹, ZHANG Wan¹, YAO Guo-Tao¹, ZHANG Xuan-Jie¹

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology of MNR, Beijing 10083, China; 3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Airborne geophysical techniques represent a cost-effective way for obtaining insights into the crustal geology of the Antarctic. Based on the analysis of the history of Antarctic airborne geophysical survey and development of facilities and fly-platform applied in the survey, this paper gives a review of the leading scientific application topic of airborne geophysical data i.e., the crustal structure of Antarctica, the reconstruction and restoration of ancient terrains, magmatism and volcanism identification, and the interaction between Antarctica Ice Shelf and bed rock, which shows that airborne geophysical survey provides effective technical support for Antarctica geosciences research. Our research shows that there is still a blank area for geophysical survey. Based on our review, the combination of airborne magnetic, airborne gravity and ice radar data has provided a new solution to the interaction study of Antarctic Ice shelf and bed rock.

Key words: airborne geophysical survey; Antarctica; current situation of geophysical survey; geophysical data application

(本文编辑:王萌)