

doi: 10.12029/gc2021Z208

论文引用格式: 韦利杰, 陈虹, 朱桂繁, 赵越, 刘晓春, 胡健民. 2021. 西南极南设得兰群岛 1 : 250 000 数字地质图数据库 [J]. 中国地质, 48(S2): 78–89.

数据集引用格式: 陈虹, 韦利杰, 赵越, 刘晓春, 胡健民, 张拴宏, 裴军令, 高亮, 郑光高, 杜星星, 朱桂繁. 2021. 中国地质调查局: 西南极南设得兰群岛 1 : 250 000 地质图数据库 [DB]. 地质科学数据出版系统. DOI:10.35080/data.C.2021.P21; <http://dcc.ngac.org.cn/cn/geologicalData/details/doi/10.35080/data.C.2021.P21>

西南极南设得兰群岛 1 : 250 000 数字 地质图数据库

韦利杰^{1,2,3} 陈虹^{1,3,4*} 朱桂繁⁵ 赵越^{1,3,4} 刘晓春^{1,3,4} 胡健民^{1,3,4}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质调查局极地地质研究中心, 北京 100081; 4. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081; 5. 自然资源实物地质资料中心, 河北 廊坊 065201)

摘要: 西南极南设得兰群岛 1 : 250 000 地质图数据库是在充分利用近年来西南极南设得兰群岛地区的地质调查和其他综合性研究成果的基础上编制而成, 同时对地层格架、年代学和古地磁极等关键地质问题进行了综合研究。编图过程中以板块构造及地球动力学理论为指导, 用 ArcGIS 10.4 平台计算机辅助成图, 成图精度高、质量好, 数据量约为 4.7 GB。综合编图和研究过程中, 根据最新获取的锆石 U–Pb 和其他矿物 Ar–Ar 年龄、电子探针和岩石地球化学数据、古地磁数据和古生物化石样品, 重新建立了中–新生代火山–沉积岩的年代学格架以及古生代地层的变质过程, 划分了 24 个地层单元, 恢复出该群岛的地层格架与沉积演化过程, 并重建了南设得兰群岛的古位置, 为南极大陆演化研究提供了详实的基础资料。

关键词: 数据库; 地质图; 中新生代火山岩; 南设得兰群岛; 西南极; 特殊地区地质填图
数据服务系统网址: <http://dcc.ngac.org.cn/>

1 引言

南设得兰群岛 (South Shetland Islands) 位于西南极大陆威德尔海西部南极半岛西北约 120 km, 距离南美洲马尔维纳斯群岛以南约 1 200 km (图 1; Weaver SD et al., 1982)。该群岛主要由象海豹岛 (Elephant Island)、克拉伦斯岛 (Clarence Island)、乔治王岛 (最大岛屿, King George Island)、纳尔逊岛 (Nelson Island)、罗伯特岛 (Robert Island)、格林尼治岛 (Greenwich Island)、利文斯顿岛 (第二大岛屿, Livingston Island)、斯诺岛 (Snow Island)、史密斯岛 (Smith Island)、迪塞普申岛 (Deception Island)、洛岛 (Low Island) 等 11 个大岛和一些小岛组成, 总陆地面积为 3687 km²。但是, 群岛内约 80%~90% 的土地

收稿日期: 2021-06-05
改回日期: 2021-06-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目: “特殊地质地貌区填图试点” (DD20160060); “渤海海峡、台湾海峡、琼州海峡等海域地应力观测与地壳稳定性评价” (DD20160149); 国家海洋局极地专项: “南极大陆矿产资源考察与评估” (CHINARE2016-02-05); 国家自然科学基金项目: “南极半岛北部-南设得兰群岛中新生代高压变质与岛弧岩浆作用研究” (41372082) 资助。

第一作者简介: 韦利杰, 女, 1974 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地层与古生物研究; E-mail: weilijie74@163.com。

通讯作者简介: 陈虹, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 主要从事区域构造与大陆变形研究; E-mail: chhxm8281@163.com。

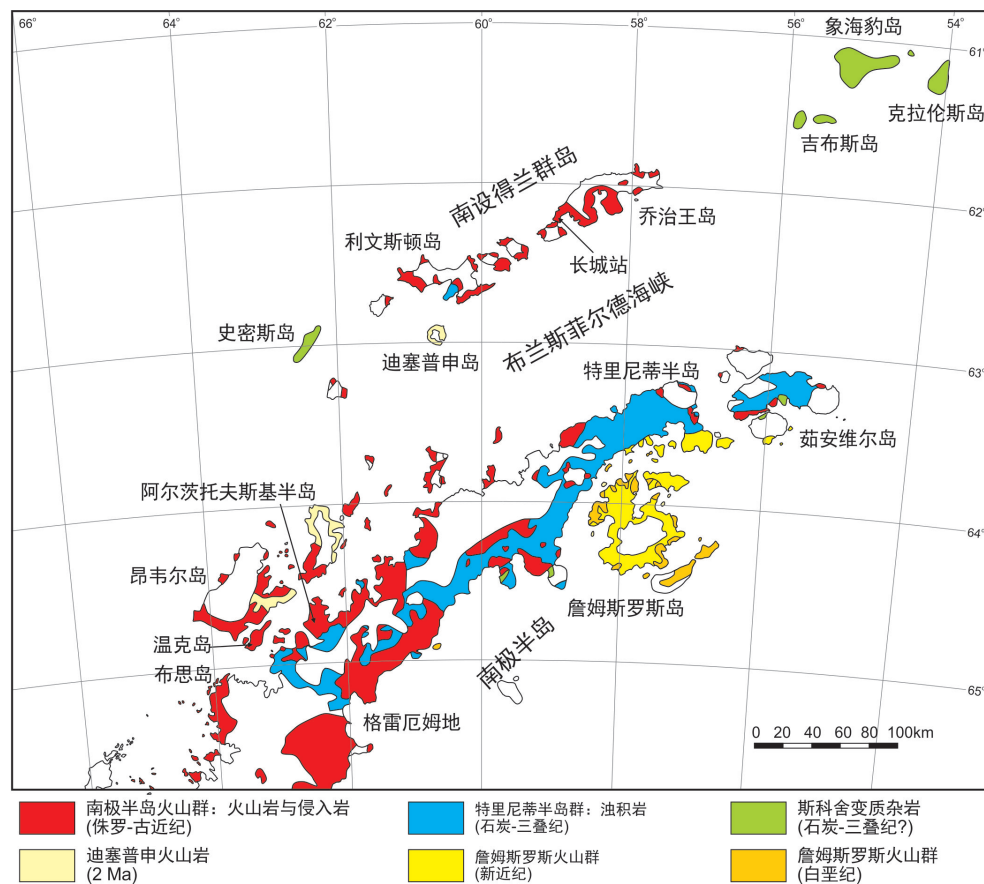


图1 南极半岛北部—南设得兰群岛地质简图

终年被冰川覆盖。

南设得兰群岛是中生代以来在太平洋板块不断向南极板块下俯冲消减的过程中逐渐形成的岩浆弧(图1),该群岛原是南极半岛的一部分,它们在晚古生代—早中生代处在同一构造环境(陈廷愚等,2008;郑光高等,2015)。在4 Ma左右,随着板块俯冲和洋脊扩张作用的全部停止,产生了弧后扩张,致使南设得兰群岛与南极半岛分离,形成了布兰斯菲尔德海峡(Gonzalez-Ferran O, 1982)。群岛所属的大小十余个岛屿基本被晚侏罗世以来形成的火山岩所覆盖(郑祥身等,1991;刘嘉麒等,2002;邢光福,2003;高亮等,2015)。晚侏罗世—早白垩世,火山岩分别出露在史密斯岛、洛岛、斯诺岛、利文斯顿岛、格林尼治岛、罗伯特岛和纳尔逊岛,岩性为(玄武质)安山质的熔岩、火山角砾岩、流纹质凝灰岩和熔结凝灰岩,以及各种火山沉积岩和海相的正常沉积岩,并含有化石,但不同地区有一定的差别(Pankhurst RJ et al., 1979; Thomson MRA, 1982; Smellie John et al., 1984, 1995, 1996; Watts Doyle R et al., 1984; Chapman JL and Smellie JL, 1992; Crame JA et al., 1993; Duane AM, 1996; 郑祥身等, 1997, 1998; Hathway B and Lomasm SA, 1998, Hathway B et al., 1999; Nawrocki J et al., 2010; Haase KM et al., 2012; 高亮等, 2015; Bastias Joaquin et al., 2020)。古近纪的火山岩以乔治王岛的菲尔德斯半岛为代表,其成分以玄武质、玄武安山质和安山质为主,另有少量的英安质亚碱性岩石组合(沈炎彬, 1990; 李兆鼎等 1992; Nawrocki J et al., 2011)。前人的研究表明,纳尔逊岛东部火山岩年龄为 66 ± 23 Ma 和 56 ± 1 Ma,波特半岛火山岩年龄为 47.6 ± 0.2 Ma (Haase KM et al., 2012)。在乔治王岛的巴顿半岛和韦弗半岛地区,玄武质、安山质熔岩和花岗岩类深成体在 45 ~ 44 Ma 短时间内喷发

和侵入, 但该期岩浆活动是只发生在巴顿半岛和韦弗半岛上, 还是在南极半岛上普遍存在, 尚有待于进一步证实 (Wang Fei et al., 2009)。

区域内的古生代基底岩系仅在中利文斯顿岛南部的赫德半岛见到, 其形成时代为晚三叠世 (Hervé F et al., 1991; 沈炎彬等, 2000)。另外以含有蓝闪石为特征的低温高压变质杂岩主要出露于南设得兰群岛靠海沟一侧的史密斯岛、吉布斯岛、象海豹岛和克拉伦斯岛, 是“斯科舍弧变质杂岩”的组成部分之一, 属于俯冲—增生杂岩, 其形成与古太平洋大洋岩石圈在中新生代的向东俯冲有关 (Saunders Andrew D et al., 1980; Barker PF et al., 1991; Hervé F et al., 1991; Leat PT et al., 1995; McCarron Joe J and Larter Robert D, 1998), 而现今的俯冲作用只发生在南设得兰群岛的西北一侧。同时由于南极半岛缺少自冈瓦纳大陆裂解以来准确的视极移曲线, 这极大地妨碍了对冈瓦纳大陆裂解过程中南极半岛内部的变形方式和古地理位置重建, 而且又阻碍了进一步讨论冈瓦纳大陆裂解对于全球气候变化的影响 (Watts DR, 1982; Grunow AM, 1993; Nawrocki J et al., 2010; Poblete F et al., 2011; Gao Liang et al., 2018)。

南设得兰群岛的地质研究历史较长, 但受气候因素、交通条件和考察设备的限制, 地质研究往往局限在各国科学考察站的站区附近, 而且均是以地质剖面 and 点上研究为主, 并各自命名独立的地层层序和地质单元, 缺乏系统的对比研究, 严重地制约了对西南极中—新生代造山带整体构造演化的理解和认知。近年来, 随着 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和U—Pb测年数据的不断增多, 为该群岛岩石地层单位重新划分提供了重要依据。在总结前人资料的基础上, 利用近几年野外实地考察的资料, 依据南设得兰群岛遥感解译工作和最新的测试结果, 我们对研究区地层层序和岩石地层单元进行了综合对比分析, 重新建立了西南极南设得兰群岛中—新生代火山—沉积岩的地层格架, 为深化研究南设得兰群岛的构造演化和古环境重建提供依据 (表1)。

2 数据采集和处理方法

2.1 数据基础

西南极南设得兰群岛1:250 000数字地质图数据库以板块构造及地球动力学理论为指导, 以不同岛屿的地质图为基础, 充分利用近期野外地质调查成果和公开发表的论文、专著等研究新进展, 地理底图采用英国南极调查局2008年出版的南设得兰群岛1:200 000地形图, 遥感底图采用美国Landsat 7传感器321合成图像以及重点区域WorldView高分辨率卫星影像, 收集的地质资料截至2018年12月。应用已有的技术标准以及国内和国际上通用的计算机软件进行数据处理和管理, 按1:250 000比例尺地质图精度要求, 建立了西南极南设得兰群岛地质图数据库。

2.2 数据处理过程

西南极南设得兰群岛1:250 000数字地质图数据库及地质图的数据处理过程与其他数字地质图 (赵利刚等, 2020; 杨泽黎等, 2020) 相似, 详细过程如下:

(1) 地理底图编制: 首先应用南设得兰群岛1:200 000地形图和遥感影像图, 根据编图范围进行裁剪、合并。并对遥感影像图进行遥感解译, 划分基岩区冰雪覆盖区。

(2) 地质底图编制: 结合最新资料, 在综合研究的基础上, 应用地球科学的新理论、新方法和新技术, 以火山岩地层的年代和层序以及侵入岩的时代为依据, 将不同地区的地层

表1 数据库(集)元数据简介

条目	描述
数据库(集)名称	西南极南设得兰群岛1:250 000地质图数据库
数据库(集)作者	陈虹, 中国地质科学院地质力学研究所 韦利杰, 中国地质科学院地质力学研究所 朱桂繁, 自然资源实物地质资料中心 赵越, 中国地质科学院地质力学研究所 刘晓春, 中国地质科学院地质力学研究所 胡健民, 中国地质科学院地质力学研究所
数据时间范围	2012—2018年
地理区域	西经54°22'~63°26'; 南纬60°30'~63°41'
数据格式	ArcGIS, JPG
数据量	4.7 GB
数据服务系统网址	http://dcc.ngac.org.cn
基金项目	中国地质调查局地质调查项目:“特殊地质地貌区填图试点”(DD20160060)、“渤海海峡、台湾海峡、琼州海峡等海域地应力观测与地壳稳定性评价”(DD20160149); 国家海洋局极地专项:“南极大陆矿产资源考察与评估”(CHINARE2016-02-05); 国家自然科学基金项目:“南极半岛北部—南设得兰群岛中新代高压变质与岛弧岩浆作用研究”(41372082)
语种	中文、英文
数据库(集)组成	1:250 000地质图库和图饰。地质图库包括遥感底图、地层、火山口、断层、地质界线、等深线、采样点、年龄、产状、各类代号等; 图饰包括: 图例、地层综合柱状图、地层对比表、区域位置图、构造格架图、乔治王岛菲尔德斯半岛和纳尔逊岛斯伯赖半岛地质图、阿德默勒尔蒂湾地质图、利文斯顿岛拜尔斯半岛地质图、迪塞普申岛地质图、地质图简介、主要参考文献、资料来源和引用格式等

进行归纳、合并,重新厘定地层层序和名称,编制形成手绘底图。

(3) 底图校正: 按1:250 000地质图编图要求,将不同地区不同比例尺的手绘地质底图扫描生成TIF格式文件。通过投影转换、误差校正与处理好的1:250 000地理底图套合、拼接,校样输出,检查修改;在屏幕上修改、编辑、审查、输出,进行初审。并选取校正控制点,保证经纬网误差和图廓点误差小于或等于0.1 mm。

(4) 地质底图矢量化: 在ArcGIS系统下进行点、线要素编辑、修改、归并;输入登记代号;拓扑造区,编辑面要素,填色整饰。所有矢量数据均存入文件地理数据库(GDB)中。

(5) 数据接边处理: 对不同地区地质图数据库进行投影转换,转换成地理坐标系后,首先与提供的理论框套合,其次再与邻区接边处理。具体处理步骤为:①地质内容衔接一致;②为了使地质图无缝入库,与邻区地质界线衔接时,采用每一条接边线进行抓线头处理,保证了地质界线无缝衔接。

(6) 编制角图与图面整饰: 1:250 000地质图的图外整饰采用统一要求,包括图例、地层综合柱状图、区域位置和构造格架、资源来源和参考文献、重要地区1:100 000和1:50 000地质图、重要地质照片和测试数据等,并结合研究区的特殊性,补充了地层对比表,图例内容按照地层单元、岩性体和其他的顺序进行编排,其中其他内容包括采样点、断层、岩层产状、火山口、考察站、测年结果、化石样品和侵入体等具体内容。

3 数据样本描述

西南极南设得兰群岛 1:250 000 数字地质图数据库按照 ArcGIS 软件平台的数据处理要求建立数据样本。

3.1 图层名称

根据主图与角图特征,分为地质主图、菲尔德斯半岛、阿德默勒尔蒂湾、拜尔斯半岛和迪塞普申岛等 5 个图层。

3.2 地质要素名称

地质图内地质要素名称主要按要素类型划分,包括等深线、地层、断层、采样点、火山口、年龄和地层代号及产状等,以 GDB 文件的形式存放。

3.3 要素(实体)类型名称

实体类型名称:点、面、线段。

点实体:同位素、地质体注记、地质符号、岩性花纹。

面实体:地层、侵入体等。

线段实体:断裂构造、等深线、产状标记、岩相界线、火山口等。

4 数据质量控制和评估

西南极南设得兰群岛 1:250 000 地质图主要以公开发表的文献中不同比例尺的地质图为基础,收集最新的地质研究成果(主要是测年数据),结合 5 次野外实地考察成果编绘而成。具体收集的资料包括菲尔德斯半岛 1:20 000 地质图、阿德默勒尔蒂 1:50 000 地质图、拜尔斯半岛 1:100 000 地质图、迪塞普申岛 1:100 000 地质图、利文斯顿岛 1:500 000 地质图,以及企鹅岛、巴顿半岛和韦弗半岛、希勒夫角、罗伯特岛、洛岛、协和角、波特半岛、半月岛、威廉堡角等较小岛屿不同比例尺地质图。此外,还搜集了相关公开发表的专著和期刊论文,共计 205 篇参考文献。野外实地考察不同岛屿 44 个,包括前人极少登陆上去的史密斯岛、斯诺岛和象海豹岛(图 2)。同时收集筛选了研究区古生物化石、侵入岩高精度(SHRIMP 及 LA-ICP-MS)锆石年龄和其他矿物 Ar-Ar 年龄

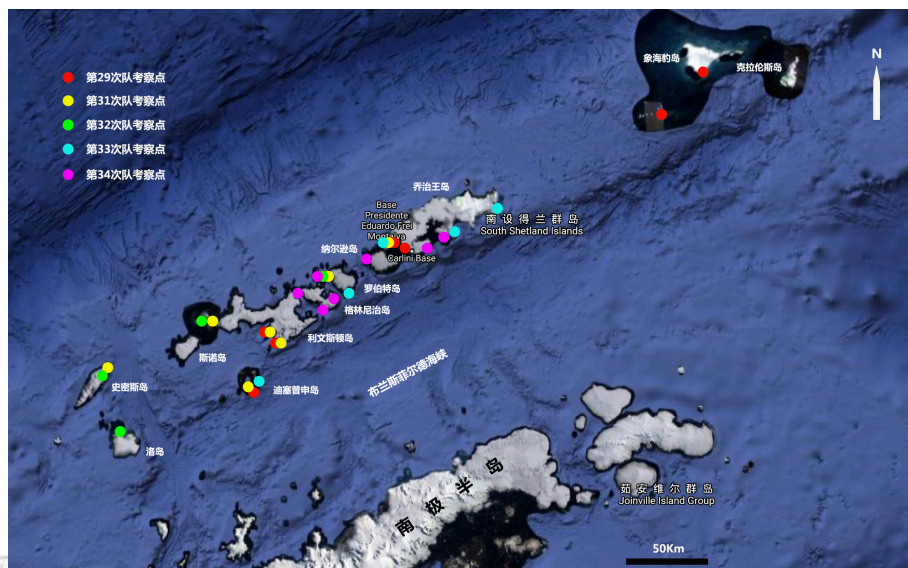


图 2 南极半岛地区 2012—2018 年地质考察路线点分布图(底图据 Google Earth)

100 余个,并将其中有明确坐标的数据进行投影作为编图参考,在此基础上还对古生代变质杂岩变质过程和群岛古位置开展专题调查,对重点岩脉和火山岩地层进行了同位素定年和地球化学测试分析,补充了相关资料数据,保证了编图成果的真实可靠。

数据质量控制方面与前人基本一致(杨泽黎等, 2020),地质图数据库汇总成型之后,先后 5 次对全图进行了全面检查与修改,主要检查图面内容的完整性和图面结构的合理性,地质单元的关系和构造格架是否合理,地质体接边属性、拓扑关系是否正确,针对地质体则检查属性及面元颜色、填充图案的完整性和准确性,以及属性和参数的匹配率,保证了数据库质量。在图面结构、地层序列划分等方面,进行了 2 轮专家审查,参照专家意见先后修改了数百处图面内容,对于古生代地层时代和新生代火山岩等有争议的问题采用多数人接受的划分或表达方式,确保地质内容能够反映最新的主流认识。

5 数据价值

5.1 重建了南设得兰群岛新生代地层划分新方案

通过资料收集,对比分析了前人年代学、地球化学、古地磁学、古生物学与地层学等方面的研究成果,尤其是针对不同岛屿同时代地层之间差异性进行全面的岩石地层与年代学对比。同时结合野外实地考察,以及相应的地层结构和年代学数据,系统建立了南设得兰群岛地区中—新生代火山—沉积岩的地层格架,比如研究区第四系地层在不同地区的对比(表 2),最终将南设得兰群岛火山—沉积地层划分为 24 个地层单元。

5.2 建立南设得兰群岛总体构造格架

对火山岩地层、二叠系变质地层和岩浆脉体进行 Ar—Ar 和锆石 U—Pb 定年。菲尔德斯半岛玄武岩样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果显示,碧玉山组—长山组年代为古新世末期—始新世早期,这与前人的地层划分方案不同(李兆鼎和刘小汉, 1987; 朱铭等, 1991; 李兆鼎等, 1992)。利文斯顿岛汉那角的玄武岩全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 98.25 ± 0.26 Ma, 这与人得到的结果基本一致(Haase KM et al., 2012)。象海豹岛低温高压变质沉积岩的变质时代为约 110 Ma, 冷却时代为约 95 Ma, 指示俯冲变质之后经历了缓慢的抬升。史密斯岛蓝片岩的变质时代为 65 ~ 62 Ma, 其蓝闪石的成分变化特征反映出岩石经历了顺时针 P—T 演化过程, 该期变质作用与南极半岛同期岩浆活动相耦合。上述构造年代学数据的获取, 为重新建立南设得兰群岛的区域构造格架奠定了基础(图 3), 结合火山岩地层的分布特征、脉体走向、海峡地貌特征和断层发育特征, 初步确定南设得兰群岛火山岩与古太平洋板块的俯冲相关, 而且具有右行运动特征。

5.3 重建南美板块南部与西南极南极半岛古地理位置

结合前人的数据分别计算了约 110 Ma, 85 Ma 和 50 Ma 的古地磁极(图 4; Gao Liang et al., 2018)。最新获得的古地磁数据显示南极半岛奥维尔海岸以北各地区自 110 Ma 之后没有发生明显的差异性旋转, 并不能完全确定南极半岛南部各地区之间是否存在差异性旋转, 后期对南极半岛南部需要进行更加详细的构造地质学、古地磁学、地球化学和年代学等方面的研究。

6 数据使用方法和建议

在信息服务上,西南极南设得兰群岛 1:250 000 地质图可作为编制各种同比例尺专

表 2 南设得兰群岛地区第四系地层对比综合图

地层时代	利文斯顿岛				乔治王岛		地层柱
	迪塞普申岛	依诺特角	梅尔维尔角	企鵝島	企鵝島群	企鵝島	
第四系	全新统	后火山口组	霍克斯群	庞德山群	彭迪尤勒姆组	依诺特角组	依诺特角组
					贝利角组	依诺特角组	彭迪尤勒姆组
更新统	上更新统				斯通斯罗山脊组	迪肯峰组	贝利角组
	中更新统	前火山口组	福斯特群	福斯特港群	外岸凝灰岩组		斯通斯罗山脊组
	下更新统				玄武岩地盾组		马尔角组
					富马罗尔湾组		
参考文献	Smellie JL, 1988, 1989	Birkenmajer K, 1992	Smellie JL, 2001	Smellie JL, 2001	Smellie JL et al., 1996	Birkenmajer K, 1982	本文

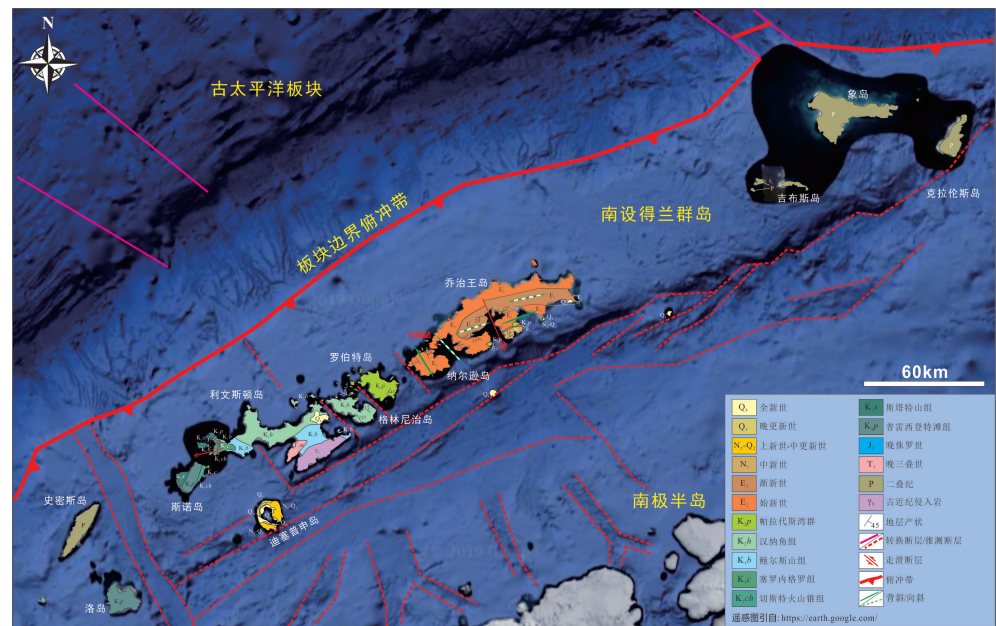


图3 南设得兰群岛构造格架图

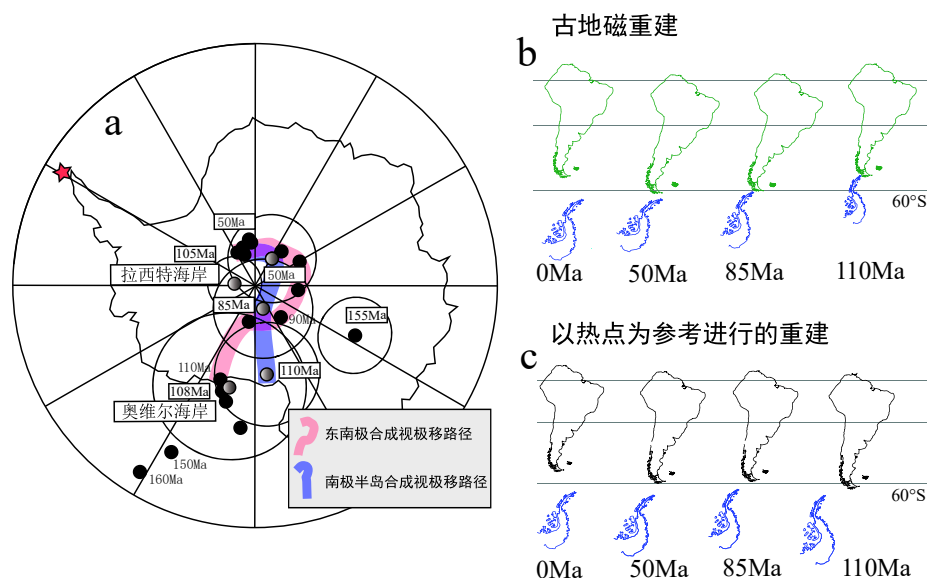


图4 西南极南极半岛与南设得兰群岛古地理位置重建 (引自 Gao Liang et al., 2018)

题图件的基础地质信息库,也可作为编制更小比例尺地质图的地质底图,从而为南极大陆各种小比例尺地质图及相应专题图件编制提供支持。在基础地质研究上,编图过程中根据板块构造理论,对南设得兰群岛地区火山岩地层按时间和空间进行了划分,并详细总结了不同时期、不同位置火山岩的测试结果、地球化学以及沉积环境的差异,建立了南设得兰群岛火山岩地层的时间、空间、物质成分及构造演化序列,相关结果以综合地层岩性柱状图的方式体现,这些成果为该地区后续基础地质调查乃至资源勘查工作提供了科学支撑。另外,局部岛屿不同比例尺地质图也可为不同站区的科学考察提供基础地质资料。

本数据库采用 ArcGIS 10.4 国际通用格式建立,编图思想先进,内容丰富、直观,可编辑性强,可与同类型数据实现叠加、合并与再处理,便于数据库的管理与信息共享。数据

库集成了最新的地质调查和科研成果,可作为以后国内外南极地质调查和科研工作的基础图件。

7 结论

西南极南设得兰群岛 1:250 000 地质图数据库是在充分利用近年来西南极南设得兰群岛地区的地质调查和其他综合性研究成果的基础上编制而成,同时对地层格架、年代学和古地磁极等关键地质问题进行了综合研究。

(1) 通过资料收集,结合年代学、地球化学、古地磁学、古生物学与地层学等研究,建立了中—新生代火山—沉积岩的年代学格架,划分了 24 个地层单元,恢复出该群岛的地层格架与沉积演化过程。

(2) 确定了象海豹岛低温高压变质岩的变质时代为约 110 Ma,冷却时代为约 95 Ma,指示俯冲变质之后经历了缓慢的抬升;史密斯岛蓝片岩的变质时代为 65~62 Ma,其蓝闪石的成分变化特征反映出岩石经历了顺时针 P-T 演化过程,该期变质作用与南极半岛同期岩浆活动相耦合。

(3) 利用古地磁数据,分别计算出南极半岛约 110 Ma、85 Ma 和 50 Ma 的古地磁极,重建了西南极半岛与南美板块南部的古位置,说明南设得兰群岛与东南极克拉通之间至少自 110 Ma 以来没有发生明显的相对运动。

致谢:在西南极野外地质考察与地质图编制过程中,得到了中国地质调查局、智利南极研究所、国家海洋局极地考察办公室、中国极地研究中心、中国科学院青藏高原研究所、中国第 29—34 次南极科学考察队等众多单位和个人的大力支持,在此一并表示感谢。

参考文献

- Barker PF, Dalziel IWD, Storey BC. 1991. Tectonic development of the Scotia Arc region. In: Tingey RJ (Ed), *Geology of Antarctica* [M]. Oxford Monographs on Geology & Geophysics, Oxford University Press, Oxford, 215-248.
- Bastias Joaquin, Calderon Mauricio, Israel Lea, Hervé Francisco, Spikings Richard, Pankhurst Robert, Castillo Paula, Fanning Mark, Ugalde Raul. 2020. The Byers Basin: Jurassic-Cretaceous tectonic and depositional evolution of the forearc deposits of the South Shetland Islands and its implications for the northern Antarctic Peninsula[J]. *International Geology Review*, 62(11): 1467-1484.
- Birkenmajer K. 1987. Oligocene-Miocene glacio-marine sequences of King George Island (South Shetland Islands), Antarctica[J]. *Palaeontologia Polonica*, 49: 9-36.
- Birkenmajer K. 1982. Report on geological investigations on King George Island and Nelson Island (South Shetland Islands, West Antarctica) in 1980-81[J]. *Studia Geologica Polonica*, 74(3): 175-197.
- Birkenmajer K. 1992. Volcanic succession at Deception Island, West Antarctica: a revised lithostratigraphic standard[J]. *Studia Geologica Polonica*, 101: 27-82.
- Chapman JL, Smellie JL. 1992. Cretaceous fossil wood and palynomorphs from Williams Point, Livingston Island, Antarctic Peninsula[J]. *Reviews of Palaeobotany and Palynology*, 74: 163-192.
- Crame JA, Pirrie D, Crampton JS, Duane AM. 1993. Stratigraphy and regional significance of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Byers Group, Livingston Island, Antarctica[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 150: 1075-1087.

- Duane AM, Ailbhe M. 1996. Palynology of the Byers Group (Late Jurassic-Early Cretaceous) of Livingston and Snow islands, Antarctic Peninsula: its biostratigraphical and palaeoenvironmental significance[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91: 241–281.
- Gao Liang, Zhao Yue, Yang Zhenyu, Liu Jianmin, Liu Xiaochun, Zhang Shuanhong, Pei Junling. 2018. New Paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Results for the South Shetland Islands, West Antarctica, and Their Tectonic Implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 4–30.
- Gonzalez-Ferran O. 1982. The Antarctic Cenozoic processes(review paper), In: Craddock C. ed., *Antarctic Geoscience* [M]. Madison, University of Wisconsin Press, 687–694.
- Grunow Anne. 1993. New paleomagnetic data from the Antarctic Peninsula and their tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B8): 13815–13833.
- Haase KM, Beier C, Fretzdorff S, Smellie JL, Garbe-Schonberg D. 2012. Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 163(6): 1103–1119.
- Hathway B, Duane AM, Cantrill DJ, Kelley SP. 1999. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology and palynology of the Cerro Negro Formation, South Shetland Islands, Antarctica: a new radiometric tie for Cretaceous terrestrial biostratigraphy in the Southern Hemisphere[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46: 593–606.
- Hathway B, Lomas SA. 1998. The upper Jurassic-lower cretaceous Byers group, South Shetland Islands, Antarctica: revised stratigraphy and regional correlations[J]. *Cretaceous Research*, 19: 43–67.
- Hervé F, Loske Werner, Miller Hadiyah, Pankhurst Robert. 1991. Chronology of provenance, deposition and metamorphism of deformed fore-arc sequences, southern Scotia arc. In: Thomson MRA, Crame JA, Thomson JW (Eds), *Geological Evolution of Antarctica* [M]. Cambridge University Press, Cambridge-New York, 429–435.
- Leat PT, Scarrow JH, Millar LL. 1995. On the Antarctic Peninsula batholith[J]. *Geological Magazine*, 132: 399–412.
- McCarron Joe J, Larter Robert D. 1998. Late Cretaceous to early Tertiary subduction history of the Antarctic Peninsula[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 155: 255–268.
- Nawrocki Jerzy, Panczyk Magdalena, Williams Ian S. 2010. Isotopic ages and palaeomagnetism of selected magmatic rocks from King George Island, Antarctic Peninsula[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 167: 1063–1079.
- Nawrocki Jerzy, Panczyk Magdalena, Williams Ian S. 2011. Isotopic ages of selected magmatic rocks from King George Island (West Antarctic) controlled by magnetostratigraphy[J]. *Geological Quarterly*, 55(4): 301–322.
- Pankhurst RJ, Weaver SD, Brook M, Saunders AD. 1979. K-Ar chronology of Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands[J]. *British Antarctic Survey Bulletin*, 49: 277–282.
- Poblete Fernando, Arriagada Cesar, Roperch Pierrick, Astudillo Natalia Isabel, Hervé F, Kraus Stefan, Roux Jacobus Philippus Le. 2011. Paleomagnetism and tectonics of the South Shetland Islands and the northern Antarctic Peninsula[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(3): 299–313.

- Saunders Andrew D, Tarney John, Weaver Stephen D. 1980. Transverse geochemical variations across the Antarctic Peninsula: implications for the genesis of calc-alkaline magmas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 46: 344–360.
- Smellie JL, Pallas R, Sábát F, Zheng X. 1996. Age and correlation of volcanism in central Livingston Island, South Shetland Islands: K-Ar geochemical constraints[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(3/4): 265–272.
- Smellie JL, Panhurst RJ, Thomson MRA, Davies RES. 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution[J]. *British Antarctic Survey Scientific Report*, 87: 1–85.
- Smellie JL, 1989. Deception Island. In DALZIELI W D, ed. *Tectonics of the Scotia arc, Antarctica*. 28th International Geological Congress, Field Trip Guidebook T180. Washington, DC: American Geophysical Union, 146–152.
- Smellie John. 2001. Lithostratigraphy and volcanic evolution of Deception Island, South Shetland Islands[J]. *Antarctic Science*, 73(2): 188–209.
- Smellie John. 1988. Recent observations on the volcanic history of Deception Island, South Shetland Islands[J]. *British Antarctic Survey Bulletin*, 81: 83–85.
- Smellie John, Liesa Montserrat, Munoz Josep Anton, Sábát Francesc, Pallas R, Willan RCR. 1995. Lithostratigraphy of volcanic and sedimentary sequences in central Livingston Island, South Shetland Islands[J]. *Antarctic Science*, 7(1): 99–113.
- Thomson MRA. 1982. Late Jurassic fossils from Low Island, South Shetland Islands[J]. *British Antarctic Survey Bulletin*, 56: 25–35.
- Wang Fei, Zheng Xiangshen, Lee Jong IK, Choe Won Hie, Evans Noreen, Zhu Rixiang. 2009. An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology on a mid-Eocene igneous event on the Barton and Weaver peninsulas: implications for the dynamic setting of the Antarctic Peninsula[J]. *Geochemistry, Geophysics & Geosystems*, 10: Q12006.
- Watts Doyle R, Watts Gary C, Bramall AM. 1984. Cretaceous and early Tertiary paleomagnetic results from the Antarctic Peninsula[J]. *Tectonics*, 3(3): 333–346.
- Watts DR. 1982. Potassium-argon ages and paleomagnetic results from King George Island, South Shetland Islands (Antarctica) [M]. In: Craddock Ced. *Antarctic Geoscience*, Madison: University of Wisconsin Press, 255–261.
- Weaver SD, Saunders AD, Tarney J. 1982. Mesozoic-Cenozoic volcanism in the South Shetland Islands and the Antarctic Peninsula: geochemical nature and plate tectonic significance [M]. In: Craddock Ced. *Antarctic Geoscience*, Madison: University of Wisconsin Press, 263–273.
- 陈廷愚, 沈炎彬, 赵越, 任留东. 2008. 南极洲地质发展与冈瓦纳古陆演化 [M]. 北京: 商务印书馆, 1–372.
- 高亮, 赵越, 杨振宇, 刘建民, 刘晓春, 张拴宏. 2015. 西南极乔治王岛白垩纪末-中新世火山-沉积地层研究新进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(6): 1109–1122.
- 李兆鼎, 刘小汉. 1987. 西南极乔治王岛菲尔德斯半岛长城站地区火山岩系的地质特征 [J]. *地质论评*, 33(5): 45–47.
- 李兆鼎, 郑祥身, 刘小汉, 尚如相, 金庆民, 王碧香. 1992. 西南极乔治王岛菲尔德斯半岛火山岩 [M].

- 北京: 科学出版社, 1-227.
- 刘嘉麒, 张雯华, 郭正府. 2002. 南极南设得兰群岛中-新生代火山作用与地质环境 [J]. 极地研究, 14(1): 1-11.
- 沈炎彬, 邓希光, 欧阳舒, 郑祥身, 刘小汉. 2000. 南极利文斯顿岛上三叠统 Miers Bluff 组及其与相当地层对比 [J]. 地层学杂志, 24(4): 291-296.
- 沈炎彬. 1990. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛地层古生物研究新见 [J]. 古生物学报, 29(2): 129-139.
- 邢光福. 2003. 南极南设得兰群岛中-新生代岛弧火山岩-侵入杂岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1-148.
- 杨泽黎, 王树庆, 胡晓佳. 2020. 1:250 000 华北侵入岩地质图空间数据库 [J]. 中国地质, 47(S1): 1-10.
- 赵利刚, 李承东, 许雅雯, 许腾, 曾威, 孙烜烨. 2020. 晋南-豫西地区 1:500 000 数字地质图空间数据库 [J]. 中国地质, 47(S1): 11-20.
- 郑光高, 刘晓春, 赵越. 2015. 南极半岛中新世构造岩浆演化及与南美巴塔哥尼亚对比 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(6): 1090-1102.
- 郑祥身, 鄂莫岚, 刘小汉, 朱铭, 李家驹. 1991. 西南极乔治王岛长城站地区第三纪火山岩地质、岩石学特征及岩浆的生成演化 [J]. 南极研究, 3(2): 10-108.
- 郑祥身, 刘嘉麒, 胡世玲, Francesc Sbat. 1997. 南设得兰群岛利文斯顿岛鲍勒斯山组火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义 [J]. 极地研究, 9(1): 28-34.
- 郑祥身, 桑海清, 裘冀, 刘嘉麒, 李鍾益, 黄政. 1998. 西南极利文斯顿岛百耳斯半岛火山岩的同位素年龄 [J]. 极地研究, 10(1): 1-10.
- 朱铭, 鄂莫岚, 刘小汉, 郑祥身. 1991. 西南极乔治王岛菲尔德斯半岛火山岩同位素年代及地层对比 [J]. 南极研究, 3(2): 126-135.

