doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.2-3.013

西南极南设得兰群岛地层对比与划分

韦利杰^{1,2,3},陈虹^{1,2,4},赵越^{1,2,4},刘晓春^{1,2,4},胡健民^{1,2,4} WEI Lijie^{1,2,3}, CHEN Hong^{1,2,4}, ZHAO Yue^{1,2,4}, LIU Xiaochun^{1,2,4}, HU Jianmin^{1,2,4}

1.中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;

2.中国地质调查局极地地学研究中心,北京 100081;

3.自然资源部新构造运动与地质灾害重点实验室,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

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Research Center of Polar Geosciences, China Geological Survey, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

4. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

摘要:对南设得兰群岛基岩区进行地质调查和研究,恢复其地层层序与演化过程。通过野外考察和资料收集,对比分析了前 人年代学、地球化学、古地磁学、古生物学、地层学等方面的研究成果,将南设得兰群岛地层划分为24个岩石地层单元,建立了 南设得兰群岛中—新生代火山-沉积地层层序和年代学格架。研究表明;南设得兰群岛火山活动早白垩世—早中新世总体呈 现从西南向东北迁移的趋势,可能是被断裂分割的洋底从西南向西北先后发生俯冲的结果;第四纪以来,伴随布兰斯菲尔德 海峡的打开,在裂谷环境中,形成了以幔源碱玄武岩浆喷发的迪塞普申岛、企鹅岛等。研究结果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。

关键词:西南极;南设得兰群岛;中-新生代;火山-沉积地层;地质调查工程

中图分类号:P53;P58 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)02/03-0347-14

Wei L J, Chen H, Zhao Y, Liu X C, Hu J M. Stratigraphic correlation and division of the South Shetland Islands, west Antarctica. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(2/3): 347–360

Abstract: Through the geological investigations and studies of the bedrock in the South Shetland Islands, the stratigraphic sequence and evolution process were restored. Based on fieldworks and data collection, previous results of geochronology, geochemistry, paleomagnetism and paleobiology, the volcanic – sedimentary strata in the area were divided into 24 stratigraphic units, and the stratigraphic framework of the Mesozoic – Cenozoic volcanic – sedimentary rocks in the South Shetland Islands was constructed. The results show that the volcanic activity in the South Shetland Islands generally migrated from southwest to northeast from early Cretaceous to early Miocene, which might be the result of the subduction of the ocean floor divided by faults from southwest to northwest. Since the Quaternary, with the opening of Bransfield Strait, Deception Island and Penguin Island have been formed with alkali basaltic magma of mantle source in the rift environment. The result provides a basis for the further study of the tectonic evolution and the paleoenvironmental reconstruction of the South Shetland Islands.

Key words: west Antarctica; South Shetland Islands; Mesozoic-Cenozoic; volcanic-sedimentary strata; geological survey engineering

收稿日期:2020-09-02;修订日期:2020-12-01

资助项目:国家自然科学基金重点项目《冈瓦纳古陆最后裂解在西南极的地质记录及其环境意义》(批准号:41930218)、中国地质调查局项目《特殊地质地貌区填图试点》(编号:DD20160060)、中国─智利国际合作项目《中智合作南设得兰群岛1:25万地质填图》
 作者简介:韦利杰(1974-),女,博士,副研究员,从事地层与古生物学方面研究。E-mail:weilijie74@163.com

南设得兰群岛位于西南极大陆威德尔海西部 及南极半岛西北约120 km,距离南美洲马尔维纳斯 群岛约 1200 km,群岛呈南西—北东向分布,长达 550 km^[1]。该群岛由象海豹岛(Elephant Island)、克 拉伦斯岛(Clarence Island)、乔治王岛(King George Island) (群岛的最大岛屿)、纳尔逊岛 (Nelson Island)、罗伯特岛(Robert Island)、格林尼治岛 (Greenwich Island)、利文斯顿岛(Livingston Island) (群岛的第二大岛屿)、斯诺岛(Snow Island)、史密 斯岛(Smith Island)、迪塞普申岛(Deception Island)、 洛岛(Low Island) 11 个岛屿及其附近若干小岛组 成,总陆地面积约 3687 km²。群岛内 80%~90% 的 陆地终年被冰川覆盖,实际基岩出露面积仅 200 km²左右。目前南设得兰群岛共有 12 个国家建立 了18个南极考察站,主要分布在乔治王岛、利文斯 顿岛等岛屿。其中,中国南极长城站于1985年建设 于该群岛的乔治王岛菲尔德斯半岛之上。

综合前人的研究成果^[2],虽然南设得兰群岛研究历史较长,但受气候因素、交通条件和考察设备的限制,当前世界各国在该地区开展的地质考察往往局限在该国家的科学考察站站区附近,造成在南设得兰群岛地区开展的地质考察均是以地质剖面和点上的研究为主,缺乏系统的区域性研究,结果导致目前对于南设得兰群岛地区的岩石地层单位不统一和地层层序的混乱,甚至有些没有名称,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,⁴⁰Ar/³⁹Ar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。本文在总结前人资料的基础上,利用近年野外 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,结合已有的年代地层学、生物 地层学、地球化学等研究成果对研究区地层层序和 岩石地层单元进行了初步研究,对其地层进行对比 和划分,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。由于研究方 法和研究程度的不同,部分地层的划分可能存在不 精确的问题,有待今后工作的不断完善。

1 区域地质背景

南极大陆划分为三大构造单元,即东南极克拉 通、西南极活动带及位于二者之间的罗斯造山带 (图1)。东南极克拉通是5亿年前泛非期形成的稳 定性克拉通陆块;罗斯造山带早古生代发育于冈瓦 纳大陆边缘,主要沿横贯南极山脉(Transantarctic Mountains)展布;西南极活动带被认为是南美洲安 第斯山脉的延续,南极半岛是西南极活动带中一个 主要的地壳块体,也是冈瓦纳超大陆古太平洋边缘 的一个关键性构造单元。南设得兰群岛原是南极 半岛的一部分,它们在晚古生代—早中生代处于同 一构造环境^[5]。



图 1 南极大陆大地构造单元示意图(a,据参考文献[3]修改)和南设得兰群岛区域构造格架图(b,据参考文献[4]修改) Fig. 1 Simple diagram of geotectonic units in Antarctica(a) and structural frame of the South Shetland Islands(b)

南设得兰群岛位于古太平洋板块和南极板块的衔接部位,其形成与三叠纪以来古太平洋板块逐渐向南极大陆板块的俯冲作用有关,是一个中—新生代活动带(图1)。南设得兰群岛地表露头主要由火山岩组成,其火山作用从中生代晚期开始持续至今,火山活动峰期为白垩纪—古近纪,是古太平洋板块向南极半岛俯冲增生的最强时期。古近纪之后,德雷克海峡逐渐打开,南极半岛与南美南部分离^[5]。在4 Ma 左右,板块俯冲和洋脊扩张作用全部停止,产生弧后扩张,使南设得兰群岛与南极半岛分离,形成布兰斯菲尔德海峡^[6]。

2 岩石地层单元划分与对比

通过资料收集,对比分析前人年代学、地球化 学、古地磁学、古生物学、地层学等方面的研究成 果,尤其是对不同岛屿同时代地层之间的差异进行 了全面的岩石地层与年代学对比。本文依据地层 规范,沿用研究程度最高且发育较全的地层对南设 得兰群岛的地层序列及岩石地层单位进行重新划 分和厘定,并对没有地层单位的岩体创建新的岩石 地层单位。根据上述原则,笔者系统整理了已有资 料和成果,同时结合5次野外实地考察,以及相应的 年代学数据、地层层序和古生物特征,将南设得兰 群岛的火山-沉积地层划分为24个地层单元,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。地层单位由老至新依次叙述如下。

2.1 二叠系

二叠系仅出露象海豹岛群(Pe:Elephant Island Group),该地层主要出露在象海豹岛、克拉伦斯岛和史密斯岛(表1)。地层主要由变质杂岩体组成,岩性以千枚岩、绿片岩、蓝片岩、变质基岩、大理岩和石英岩为主。史密斯岛变质原岩与象海豹岛和克拉伦斯岛年代相近,同属于古生代晚期的二叠纪^[7]。象海豹岛南部的 Rb-Sr 同位素年龄为 250 Ma 和 270 Ma,该岛的岩石在白垩纪经历了主要的

表 1 南设得兰群岛二叠系对比 Table 1 Correlation of Permian stratigraphy in the

South Shetland Islands

地层时代	史密斯岛	象海豹岛	克拉伦斯岛	地层柱
二叠系	变质杂岩体	变质杂岩体	变质杂岩体	象海豹岛群
参考文献	[7]	[8]	[8]	本文

变形和变质作用¹⁸¹。该套变质杂岩体没有岩石地层 名称,本文将这套变质杂岩体创建为新的岩石地层 单位"象海豹岛群",地层时代为二叠纪。

2.2 **三**叠系

三叠系仅出露上三叠统迈尔斯陡崖组(T₃m: Miers Bluff Formation),出露在利文斯顿岛的赫德半 岛(Hurd Peninsula)和威廉斯角(Williams Point)(表 2),为该群岛最老的中生代地层,形成于板块俯冲 早期阶段。该地层总厚度大于 3 km,是一套强烈变 形、岩层发生倒转的浅变质沉积地层,岩性主要为 块状砂岩、深灰色泥岩、含砾泥岩、砂泥互层等,多 认为是弧前背景下的海底扇浊流沉积,其物源来自 活动的火山区及低级变质的岩浆地带。迈尔斯陡 崖组页岩的 Rb-Sr 年龄为 204±19 Ma 和 221±34 Ma,是目前该组岩层最年轻的年龄^[9-10]。沈炎彬 等^[11]也获得了有价值的孢粉、疑源类、植物表皮角 质层、木材管胞等化石,认为其时代为晚三叠世。

2.3 侏罗系

侏罗系仅出露上侏罗统安克雷奇组(J₃ a: Anchorage Formation),出露在利文斯顿岛的拜尔斯 半岛西北部和洛岛的华莱士角(Cape Wallace)(表3)。 华莱士角由火山碎屑岩和凝灰岩组成,含双壳类等

表 2 南设得兰群岛三叠系对比 Table 2 Correlation of Triassic stratigraphy in the South Shetland Islands

바	己叶伟	利文期	所顿岛	地层柱		
<u> 1</u> 민)	云时代	赫德半岛	威廉斯角			
三叠系	上三叠统	迈尔斯陡崖	组	迈尔斯陡崖组		
	中三叠统		威廉斯角层			
	下三叠统					
参	考文献	[9-12]	[12]	本文		

表 3 南设得兰群岛侏罗系对比

Table 3 Correlation of Jurassic stratigraphy in the South Shetland Islands

Li la	日中心	洛岛	地层柱		
迎	层时代	华莱士角	拜》		
	上侏罗统	沉积岩	泥岩段	安克雷奇组	安克雷奇组
朱罗系	中侏罗统				
	下侏罗统				
参	考文献	[13]	[12]	[14-15]	本文

古生物化石,双壳类等海相古生物化石也被认为属 于晚侏罗世^[13]。安克雷奇组泥岩全岩 Rb-Sr 同位 素年龄为 163±16 Ma^[12],该组上部 U-Pb 年龄为 153.1±1.7 Ma^[14]。安克雷奇组在拜尔斯半岛的厚度 约 120 m,主要由富含放射虫的泥岩及少量薄层砂 岩、凝灰质泥岩组成,见黄铁矿,为深海半远洋沉 积^[15]。安克雷奇组的地质时代为晚侏罗世。

2.4 白垩系

白垩系在群岛中部均有出露,其中早白垩世地 层主要出露于西南侧的洛岛、斯诺岛和利文斯顿 岛,主要地层为普雷斯登特滩组、斯塔特山组、切斯 特火山锥组、赛罗内格罗组和鲍尔斯山组;而晚白 垩世地层主要出露于东北部的利文斯顿岛、格林尼 治岛、罗伯特岛和乔治王岛,主要地层单元为汉纳 角组和帕拉代斯湾群。

(1)下白垩统普雷斯登特滩组(K₁p:President Beaches Formation)

普雷斯登特滩组出露在利文斯顿岛的拜尔斯 半岛西部,分布较广泛,厚度大于 600 m。下部为数 百米厚的黑灰色泥岩与薄层砂岩互层,泥岩中见水 平层理,遗迹化石稀少,少见放射虫^[16]。砂岩多以 透镜状形式产出,见鲍玛序列,属风暴浪基面之下的 斜坡区沉积。上部厚约 244 m,岩性、岩相均发生突 变,岩性以粗砂、砾质砂岩、砾岩为主,夹薄层泥岩、粉 砂岩。底部见侵蚀面,发育递变层理、交错层理等,主 要为扇三角洲沉积^[15]。孢粉化石和沟鞭藻组合确定 该组年代为早白垩世中晚贝利阿斯期^[17-18]。

(2)下白垩统斯塔特山组(K₁s:Start Hill Formation)

斯塔特山组出露在利文斯顿岛的拜尔斯半岛, 厚度大于 260 m,岩性以粗砂岩、砾质砂岩、砾岩为 主,夹薄层泥岩、粉砂岩。斯塔特山组火山角砾岩 全岩 K - Ar 年龄为 128 ±3 Ma 和 123 ±4 Ma^[12], ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar年龄为 135.2±2.57 Ma^[19],属于早白垩世晚 贝利阿斯期。

(3)下白垩统切斯特火山锥组(K₁*h*:Chester Cone Formation)

切斯特火山锥组出露在利文斯顿岛的拜尔斯 半岛(Byers Peninsula)西北部,厚度大于 300 m,岩 性由中厚层的角砾岩和集块岩组成,碎屑成分为玄 武质、玄武安山质火山岩,分选性差,无沉积构造, 为火山通道口附近的产物。该组内集块岩 K-Ar 年 龄为 128 Ma 和 123 Ma^[12]。切斯特火山锥组顶部流 纹岩 U-Pb 年龄约为 120 Ma^[20]。⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为 135 Ma(辉长岩)、114 Ma(安山岩)和 71 Ma(玄武 岩)^[21]。孢粉组合也指示年代为早白垩世晚贝利阿 斯期—早凡兰吟期,上部为中凡兰吟期^[17-18]。洛岛 华莱士角也有出露,花岗闪长岩 U-Pb 年龄为 137.1±1.7 Ma 和安山岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 为 136~139 Ma^[14]。因此,切斯特火山锥组地质时代为早白垩世 晚贝利阿斯期—凡兰吟期。

(4)下白垩统赛罗内格罗组(K₁ c: Cerro Negro Formation)

赛罗内格罗组分布从利文斯顿岛的拜尔斯半岛中部向东延伸,厚度大于 200 m,与下伏地层呈低角度不整合接触,下部以熔结凝灰岩为主,夹硅质火山碎屑岩地层,上部主要为玄武质火山砾凝灰岩、凝灰质角砾岩^[22],属于火山弧环境的钙碱性岩系^[21]。赛罗内格罗组凝灰岩中斜长石和碎屑岩中黑云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄 120.3±2.2 Ma 和 119.4±0.6 Ma^[22],以及孢粉组合特征等,指示其形成于早白垩世^[15]。该组顶部内格罗山火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 102.4±1.3 Ma^[19],为鲍尔斯山组。因此,认为该组时代为早白垩世阿普特期^[15]。

(5)下白垩统鲍尔斯山组(K₁b:Mount Bowles Formation)

鲍尔斯山组出露于利文斯顿岛中部和斯诺岛 的霍尔半岛(Hall Peninsual),主要由安山岩质熔岩 组成,只有很少的火山碎屑岩夹层、熔岩、岩墙等。 除安山岩外,还有玄武岩和粗玄岩。与利文斯顿岛 其他地方出露的晚中生代火山岩相比,鲍尔斯山组 的岩石蚀变较强。岩石基质的原生结构大部分已 被破坏^[23]。拜尔斯半岛海豹猎人山(Sealer Hill)柱 状玄武岩 K-Ar 年龄为 108±4 Ma^[24],⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄 为 111 Ma^[25]。郑祥身等^[26]采用⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 法和激光 微区等时线方法,对南极南设得兰群岛利文斯顿岛 东部产出的鲍尔斯山组火山岩重新进行了年龄测 定,结果表明,安山质熔岩和玄武安山质熔岩的年 龄分别为105.62±2.11 Ma 和111.48±2.23 Ma。斯 诺岛霍尔半岛上部火山岩 U-Pb 年龄为 109.0±1.4 Ma^[14]。综合分析,鲍尔斯山组的地质时代可能为早 白垩世阿尔布期。

(6)上白垩统汉纳角组(K₂h:Hannah Point Formation)

汉纳角组出露于利文斯顿岛的汉纳角(Hannah

Point)、希勒夫角(Cape Shirreff)、西登斯角(Siddons Point)和威廉斯角的下部。汉纳角主要为厚层块状 安山岩和集块岩互层,底部由薄层杏仁状熔岩及凝 灰岩组成,中部由松散的集块岩、薄层凝灰岩及褐 色的杏仁状熔岩组成,顶部为厚层块状安山岩夹杏 仁状熔岩的互层。汉那角下部出露的玄武安山岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 97.35±0.39 Ma^[19];玄武岩全岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 98.25±0.26 Ma^[27]。希勒夫角下 部主要出露橄榄玄武岩和玄武安山岩,玄武岩 K-Ar 年龄为 90.2±5.6 Ma^[28]。希勒夫角底部⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为109.2±0.46 Ma^[19],应归为鲍尔斯山组。威 廉斯角主要为玄武岩和集块岩,所产的植物化石证 明其时代属白垩纪中期巴雷姆期—坎潘期[29]。利 文斯顿岛中部(汉那角)侵入体英云闪长岩 K-Ar 年 龄为 41.4 ± 1.3 Ma(角闪石)和 43.3 ± 2.8 Ma(全 岩)^[23]。综合分析,汉纳角组的地质时代可能为晚 白垩世赛诺曼期—康尼亚克期。

(7)上白垩统帕拉代斯湾群(K₂p:Paradise Cove Group)

帕拉代斯湾群出露在乔治王岛的阿德默勒尔 蒂湾(Admiralty Bay),以及汉纳角、希勒夫角、西登 斯角和威廉斯角的上部,包括尤查特卡角组和克雷 平斜坡组2个组。下部的尤查特卡角组主要为绿色 玄武质熔岩,阿德默勒尔蒂湾锆石 U-Pb 和40 Ar/39 Ar 坪年龄为 75.4±0.9 Ma^[30];西登斯角上部出露的粗 玄岩 K-Ar 年龄为 73.0±2.3 Ma^[28];威廉斯角主要为 玄武岩和集块岩,所产的植物化石证明其时代属白 垩纪中期巴雷姆期—坎潘期^[29],岩床及岩脉的全岩 K-Ar 年龄分别为 79~74 Ma 及 81±2 Ma^[31]。另外, 出露在罗伯特岛的科珀曼半岛 (Coppermine Peninsula)的帕拉代斯湾群,主要为玄武质熔岩、火 山角砾岩及侵入式玄武岩,玄武岩"Ar/39Ar 年龄为 82.1±0.44 Ma^[19]。上部的克雷平斜坡组主要为红色 页岩夹绿色凝灰质和片状砾岩层。由于上部的克 雷平斜坡组缺乏年代学数据和古生物,所以暂定帕 拉代斯湾群的地质时代为晚白垩世圣通期—马斯 特里赫特期。南设得兰群岛白垩系对比结果见 表4。

2.5 古近系

古近系仅在乔治王岛和纳尔逊岛地区出露。 前人研究成果和年龄数据显示,古新统、始新统和 渐新统均有分布。但是根据最新的年龄结果,划分 为下始新统的巴兰诺夫斯基冰川群、埃斯库拉湾群 和菲尔德斯半岛群,中始新统的埃内坎角群,上渐 新统的迪斯特拉克申湾组、波罗内兹湾组和阿德默 勒尔蒂湾群。不同地层单元存在明显的相变特征, 不同地区地层岩性特征如下。

(1)下始新统巴兰诺夫斯基冰川群(E₂ b:
 Baranowski Glacier Group)

巴兰诺夫斯基冰川群出露在乔治王岛的阿德 默勒尔蒂湾。该群被划分为3个组,自下而上依次 为德迈角组、拉诺角组和扎米克组。德迈角组主要 为长英质火山岩、凝灰岩、火山角砾岩及砾岩,含大 块硅化木;拉诺角组主要为玄武安山质熔岩,夹火 山碎屑岩与红色凝灰质砂岩;扎米克组为灰黑色到 绿色玄武岩和普通辉石安山质熔岩及火山渣和凝 灰岩互层,厚度超过1100 m。德迈角组⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 坪 年龄为52.7±0.6 Ma,SHRIMP 锆石 U-Pb 为53.0± 0.7 Ma^[30]。拉诺角组扎米克山⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为50~ 49.5 Ma^[35]。扎米克组产树干及叶化石假山毛榉 (*Nothofagus* sp.)、松柏类及蕨类,K-Ar 同位素年龄 为46~42 Ma^[36],从该组所含的化石面貌看,可能与 菲尔德斯半岛群化石山组相当,可能属于早始新世 早期。

(2)下始新统埃斯库拉湾群(E₂e:Ezcurra Inlet Group)

埃斯库拉湾群出露在乔治王岛的阿德默勒尔 蒂湾。该群分成2个组,阿克多夫斯基湾组和托马 斯角组。阿克多夫斯基湾组可划分为拉库萨角段、 哈拉段、石化林段和贼鸥崖段。拉库萨角段为厚层 块状玄武安山岩熔岩流,厚60m;哈拉段为熔岩、砾 岩、凝灰质页岩,含木化石碎片;石化林段为陆相沉 积层,厚30~50m,由页岩、泥岩、凝灰质砂岩及扇 砾岩及煤层组成,底部有侵蚀面,含*Nothofagidites*(假 山毛榉粉)-*Pteridophyte* 孢粉组合、植物叶及木化 石^[37];贼鸥崖段为玄武安山熔岩,含木化石碎片,安 山岩 K-Ar 同位素年龄为42.1±1 Ma^[12]。托马斯角 组由熔岩及凝灰岩组成,利用锆石 U-Pb 与古地磁 方法重新确定其年代为48.9±0.7 Ma^[30]。综合分 析,埃斯库拉湾群的地质时代可能为早始新世晚期。

(3)下始新统菲尔德斯半岛群(E₂*fp*: Fildes Peninsula Group)

菲尔德斯半岛群主要出露在乔治王岛的菲尔德斯半岛(Fildes Peninsula)、纳尔逊岛、韦弗半岛

	地层		帕拉代 斯湾群	汉纳角组	鲍尔斯 山组	赛罗内 格罗组		切斯特火 山锥组	斯塔特 山组	普雷西登 特滩组	本文
	日	↑ 治 ぎ	马祖勒								[5,34]
	乔治王	阿德默勒尔 蒂湾	11 消 斯 斯 水 兰 犬 碁 川 雅 元 和 川 和 村 和 川 和 浩 相 一 雅 四 福 御 御 四 朝	唐 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市							[5,33]
	罗伯特岛	科珀曼 半岛	科 曼 (田 半 :	J							[12]
spue	岛	通問	威堡 諾廉 角		1						
nd Isl	林尼治	没 七 年	威堡群角								[32]
Shetla	格	威廉	威堡群角								
South		威 斯	× *								[12]
n the S		西 樹 街 角	火 王 王								
ıphy iı		汉 魚	ッ								[28]
ratigra		称 志 朝 角	× ^光								
ous sti	斩顿岛	* 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		×山							[12]
Cretace	利文	鲍 斯山			鲍尔斯 山组						[26]
relation of		回 万			火山岩	赛罗内格 罗组		切斯特火 山锥组	斯塔特 山组	普雷西登 特滩组	[15]
Cor		葉 半				集块岩	火山 岩段		马里 纳段		12]
lable 4								拜尔斯群			
Ľ	告島	筆 半 次 岛			火山岩						[26,28]
	斯词	普雷西 發特 <u></u>			火山岩	赛罗内格 罗组			切斯特火山維组	_	[12,15]
	臣	- 町 町			大山 市 市		L	1			[{
	''''	华 末 年			火山 ^治						[]
		晨时代	马	土 仑 吟 兼 诺 曼 弥	阿尔布阶	阿普特阶	巴雷姆阶欧特里夫阶	凡兰阶	贝利阿	资	学文献
		地厅		上白垩统	白垩系			1	−□HSHSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSS		ж) т

表 4 南设得兰群岛白垩系对比

352

2022 年

(Weaver Peninsula)和巴顿半岛(Barton Peninsula) 等,与巴兰诺夫斯基冰川群和埃斯库拉湾群属于同 时异相地层单元。根据岩性特征、地质分布和上下 接触关系,可进一步细分为碧玉山组、玛瑙滩组、化 石山组、岩块山组和长山组。碧玉山组分布于菲尔 德斯半岛的西南部,以玄武岩和玄武安山质熔岩为 主,底部有火山角砾岩和集块岩,夹茎干化石,厚 60~120 m。玛瑙滩组分布较广,以杏仁状玄武质和 玄武安山质熔岩为主,底部有火山角砾岩和集块 岩,厚140m。化石山组由火山角砾岩、层凝灰岩、 凝灰质粉砂岩、熔岩组成,夹煤线。产孢粉、植物 叶、茎干、鸟类足印等遗迹化石,厚6~60 m。岩块 山组分布于半岛东部,主要由集块熔岩、角砾熔岩 和玄武质或玄武安山质熔岩组成,厚 36~94 m。长 山组以玄武安山质熔岩及相应的次火山岩为主。 另外,菲尔德斯半岛群在乔治王岛的韦弗半岛也有 出露,岩性主要为火山角砾岩与集块岩,以及玄武 质和安山质熔岩。

Haase 等^[19] 在乔治王岛菲尔德斯半岛北部与南 部及纳尔逊岛东部得到 56.1±0.3 Ma,55.21±0.49 Ma 和 55.8±1 Ma 的火山岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 和 K-Ar 年龄。 碧玉山组、玛瑙滩组顶部、岩块山组和长山组的玄 武岩全岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 坪年龄分别为 55.09±0.25 Ma、 56.38±0.20 Ma、54.66±0.56 Ma 和 52.42±0.19 Ma^[38]。化石山组叶化石、孢粉植物群等证明,该组 属于中始新世^[39-41];叶化石指示该组属于早中始新 世^[42]。韦弗半岛菲尔德斯半岛群黑云母⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为 48.4±0.5 Ma^[43]。综合分析,菲尔德斯半岛 群的地质时代可能为早始新世。

(4)中始新统埃内坎角群(E₂ h: HennequinPoint Group)

埃内坎角群主要分布在乔治王岛的阿德默勒 尔蒂湾的瓦维尔山(Mount Wawel),总厚度约 300 m。下部为厚层玄武安山质熔岩,夹薄层紫红 色凝灰角砾岩;中部为杂色凝灰角砾岩,成层性好, 夹正常沉积碎屑岩,含丰富的植物化石;上部为多 层厚层状玄武质熔岩。埃内坎角群还分布在梅尔 维尔角陡崖底部、波特半岛、韦弗半岛和巴顿半岛。 波特半岛埃内坎角群由玄武岩与安山质熔岩组成, 夹火山碎屑岩,有部分浅成侵入体,玄武岩、安山岩 和流纹岩的⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为 47.19±0.5~45.7±1.2 Ma,时代为中始新世^[44]。巴顿半岛全岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为48.4±0.5 Ma^[45]。韦弗半岛东西向岩墙黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为44.7±0.8 Ma 和44.6±1.1 Ma,巴顿半岛和韦弗半岛玄武质及安山质熔岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为44.2±1.6 Ma、45.8±1.7 Ma 和 44.8±0.6 Ma^[46]。综合分析,埃内坎角群的地质时代可能为中始新世。

(5)上渐新统迪斯特拉克申湾组(E₃ d: Destruction Bay Formation)

迪斯特拉克申湾组分布在乔治王岛的梅尔维 尔角(Cape Melville),该组主要由灰黑色玄武质凝 灰岩和凝灰质砂砾岩组成,发育大型交错层理,偶 见泥质夹层,海相化石丰富。许多沉积物来源于下 伏的谢勒特湾组,属陆架边缘-潮坪环境下沉积。 发现多门类的海生生物化石,有双壳类、腹足类、腕 足类、单体珊瑚等化石。Sr 同位素年龄为 25.3±0.8 Ma^[47]。因此,迪斯特拉克申湾组的地质时代可能为 晚渐新世。

(6)上渐新统波罗内兹湾组(E₃p:Polonez Cove Formation)

波罗内兹湾组分布在乔治王岛的乔治王湾 (King George Bay)。该组为冰川沉积地层,厚20~ 70 m。下部的克拉科维亚克冰川段为陆地冰碛层, 由外来碎屑物堆积的杂岩及砂岩组成。洛岬段属 冰海沉积,由玄武质砾岩夹页岩、细砂岩组成,含海 相化石及冰川漂砾。斯克拉瓦段也属冰海沉积,由 韵律层状砂岩、粉砂岩及页岩组成,化石富集层含 冰川漂砾。奥布勒克陡崖段属冰海沉积,由砾岩、 砂岩组成,含海相化石,冰川漂砾常见。对奥布勒 克陡崖段玄武熔岩测年得到26.0±2.59 Ma和25.6± 1.3 Ma的⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄,对洛岬段玄武熔岩测年得 到26.4±1.2 Ma和27.2±0.7 Ma的⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年 龄^[48]。综合分析,波罗内兹湾组的地质时代可能也 为晚渐新世。

(7) 上 渐 新 统 阿 德 默 勒 尔 蒂 湾 群 (E₃ ab:Admiralty Bay Group)

阿德默勒尔蒂湾群主要分布在阿德默勒尔蒂 湾,该群被划分为5个组,自下而上依次为凯勒半岛 组、维斯卡锚地组、多姆依柯冰川组、于尔曼山嘴组 和格特尔冰川组。凯勒半岛组:下部为含集块角砾 熔岩、熔结凝灰岩;上部主要由火山碎屑岩组成,以 凝灰角砾岩多见,黄铁矿化蚀变强烈。维斯卡锚地 组:下部为灰绿色、暗灰色玄武质安山岩;中部为厚

层状杂色集块岩、含集块凝灰角砾岩,偶夹熔岩透 镜体,属近火口相,发育黄铁矿化和硅化,本部分顶 部见灰褐色多斑熔岩流;上部为厚层状凝灰质砾 岩、深灰色凝灰岩。多姆依柯冰川组:下部为厚层 灰绿色玄武质安山岩;中部为灰绿色、灰紫色含集 块凝灰质角砾岩:上部为厚层状熔岩夹凝灰质角砾 岩。于尔曼山嘴组:灰绿色火山碎屑岩,仅底部见 数薄层熔岩。格特尔冰川组:以玄武质安山岩为 主。该群还发育放射状岩墙和岩脉,推测为侵入岩 体,岩性变化较大,从玄武岩到英安岩均有。邢光 福等^[49] 测得凯勒半岛组的 K-Ar 年龄为 51.9±1~ 48.75±2 Ma, 于尔曼山嘴组的 K-Ar 年龄为 40.2±2~ 38.7±1 Ma。但是,根据地层的空间分布及上下层 的接触关系,判断阿德默勒尔蒂湾群的地质时代可 能更新,暂定为晚渐新世。南设得兰群岛古近系对 比结果见表 5。

2.6 新近系

新近系在群岛内主要出露于乔治王湾、梅尔维 尔角、企鹅岛(Penguin Island)等地区。其中,乔治王 湾和梅尔维尔角地区仅出露中新世早期梅尔维尔 角组等,而企鹅岛地区仅出露上新世晚期马尔角组。

(1)下中新统梅尔维尔角组(N₁ m: MelvillePiont Formation)

梅尔维尔角组分布在乔治王岛的梅尔维尔角。 该组厚约 150 m,底部为粗粒冰成碎屑流沉积与冰 海相泥岩、砂岩互层,向上为细粒沉积,以灰色、灰 黑色泥岩、砂质泥岩为主,代表由于冰川后退或相 对海平面上升引起的冰海相近端沉积。上部岩性 以粉砂质泥岩、凝灰岩为主,偶见间歇性注入的冰 成碎屑,为冰海相远端沉积。梅尔维尔角组凝灰岩 中角闪石⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为 21.0±3.1 Ma^[53],该组有 孔虫可分为 2 个组合,下部为 *Cibicides – Cibicidoides* 组合;上部为 *Cribrostomoides – Cyclammina – Globobulimina* 组合,时代都相当于早中新世^[54]。因 此,梅尔维尔角组的地质时代可能为早中新世。

(2)下中新统博伊角组(N₁ b: Boy Point Formation)

博伊角组分布在乔治王岛的乔治王湾。该组 不整合覆于波罗内兹湾组之上,由酸性斑状熔岩与 凝灰岩、集块岩互层组成,厚 20~100 m。该组缺 失⁴⁰Ar/³⁹Ar 和 U-Pb 年代学数据,根据地层层序把 博伊角组的时代暂定为早中新世。

(3)下中新统维瑟尔湾组(N₁w:Wesel Cove Formation)

维瑟尔湾组分布在乔治王岛的乔治王湾,该组 不整合覆于博伊角组之上,主要由集块岩、砾岩、砂 岩组成(来源于下伏的博伊角组)。该组缺失 ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar和 U-Pb 年龄数据,根据地层层序把维瑟 尔湾组的时代暂定为早—中中新世。

(4)上上新统一中更新统马尔角组(N₂-Q₂m: Marr Point Formation)

马尔角组主要分布在迪塞普申岛和企鹅岛,由 灰黑色玄武质熔岩组成,该熔岩含橄榄石、斜长石 和单斜辉石斑晶,斑晶长度可能超过1.2 mm。斜长 石斑晶的晶核和晶缘由钠辉石和拉斑玄武岩组 成。⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果 2.7±0.2 Ma 表明,马尔角组 为晚上新世^[55]。马尔角组上覆地层为上更新世斯 通斯罗山脊组,据此推测马尔角组地质时代可能为 晚上新世—中更新世。南设得兰群岛新近系对比 结果见表6。

2.7 第四系

第四系在群岛分布非常有限,主要出露于群岛 东南侧海岸线,包括迪塞普申岛、利文斯顿岛依诺 特角(Inott Point)、乔治王岛梅尔维尔角、企鹅岛等 地区(表7)。其中,更新统仅在迪塞普申岛地区发 育(见2.6(4)上上新统一中更新统马尔角组),而在 其他地区仅发育全新统。

(1)上更新统斯通斯罗山脊组(Q₃s:Stonethrow Ridge Formation)

斯通斯罗山脊组分布在迪塞普申岛,主要由玄武岩和玄武质安山岩、红色和黑色的粗火山渣、栗色胶结物和灰色熔岩组成。熔岩呈块状,通常厚4~5 m,最厚达45 m。灰色熔岩 K-Ar 同位素年龄为150±46 ka^[57]。斯通斯罗山脊组地质时代定为晚更新世。

(2)全新统贝利角组(Q₄b:Baily Head Formation)

贝利角组分布在迪塞普申岛,该组固结成岩作 用较差,由灰色、卡其色层状砾石层和火山砾凝灰 岩组成。这些沉积物基本与彭迪尤勒姆组的沉积 物类似,但固结程度较高,且火山构造和形态未保 存。根据上下地层关系,推测该组地质时代为全 新世。

	地层柱					<i>本 4</i> 世	火 用杆	埃斯库拉湾群	巴兰诺夫斯	奉 亦川枏				<u>ب</u> ک
				_		- 平 学								*
		梅尔维尔角	阿德默 补蒂湾帮				菲 光 。 书 品							
		王湾	迪斯特拉 克申湾组					-	谢勒特 湾组					[5,34]
ands		乔治	勤格日	读群										.34]
tland Isl			波 罗 内	波 兹罗 湾内 组								[5,		
outh She		り尔蒂湾						贼鸥崖段		石化林段	哈拉段		拉库萨 角段	
岛古近系对比 on table of the So	g dǎo 日	阿德默勒	瓦维尔	山组	内 日 出	托 ^{马朔} 角组	阿 斯 乙 基本							[5,33]
	^{qiéo zhi wér} 乔治王		埃内坎						埃斯库 拉湾群					
设得兰群 comparis		波特半岛				표민식	УШĄ						[12]	
表 5 南 ligraphic		韦弗半岛 巴顿半岛					표민식	УШĄ		世宗王组				[52]
gene stra			长山段		岩块山段	光 石山段			玛瑙滩段	開			[0]	
5 Paleo		斯半岛			化石山组					地理湾组				[2
Table !		菲尔德			化石山段		吗瑙滩段					碧玉山段		1]
											长城组			[5
	函题				岩块山段		化石山段			玛瑙滩段			碧玉山段	[(
	纳尔。				化石山纽	化石山组					地理湾组			[5(
	47+1		上渐新统	下渐新统	上始新统		廿 姫 郝 筑	下始新统		上古新统	中古新统		下古新统	文献
	一型 一型		渐新统	始新统			+	口近系	<u>+</u> π;	新统		·		参考

355

	表 6	南设	得主	と群!	品新	近系	际对	比			
-	 			-	-			~	-	 -	

	ᇥᇦᆎᄱ			乔治王岛									
	吧云旳卂	4	菲尔德	斯半岛	阿德默勒尔蒂湾	乔治	乔治王湾		隹尔角	企鹅岛			
新近系	上车站	上上 新统								马尔角组	马尔角	角组	
	工机红	下上 新统											
		上中 新统											
	中新统	中中 新统			阿德默勒								
		下中			尔蒂湾群	肖邦山	维瑟尔 湾组	莫比迪	梅尔维尔		维瑟尔 湾组	梅尔维	
		新统	化石组	岩块 山段		脊群	博伊 角组	克群	角组		博伊 角组	尔角组	
参考文献		[51] [5,33]		[5,34]		[5,37]		[56]	本江	ζ			

Table 6 Correlation of Neogene stratigraphy in the South Shetland Islands

(3) 全新统彭迪尤勒姆湾组(Q₄ p: Pendulum Cove Formation)

彭迪尤勒姆湾组主要分布在迪塞普申岛,由玄 武质安山岩、安山岩组成,并含少量的英安岩。固 结成岩作用较差,火山碎屑岩相主要包括灰色层状 砾石层、火山砾凝灰岩和火山灰,伴有丰富的岩屑, 固结成岩作用较差。直径达 30 cm 的砾石很常见, 而且大多数没有凹陷结构。火山构造和形态保存 完好。彭迪尤勒姆湾组还分布在利文斯顿岛的东 北部,从依诺特角到伯第克峰的区域,以及夏普峰 的周围,层状凝灰角砾岩、凝灰岩和角砾岩发育。 在依诺特角,粗玄岩岩颈具有非常壮观的柱状节 理。在乔治王岛周缘的企鹅岛上部也有分布,由棕 红色玄武质熔岩组成,通过地衣测年确定时代为 18—19世纪中期和 1905年[34]。该组年龄最新,形 成于全新世。南设得兰群岛第四系对比结果见 表7。

3 岩浆作用与构造演化

南设得兰群岛位于古太平洋板块和南极板块 的衔接部位,其形成与三叠纪以来古太平洋板块逐 渐向南极大陆的俯冲作用有关,是一个中-新生代 的活动带,主要由二叠纪—三叠纪浅变质弧前盆地 沉积岩或增生杂岩、侏罗纪沉积岩及白垩纪—全新

世的火山岩和碎屑岩构成,一般认为是古太平洋边 缘岩浆弧火山作用的产物[12]。

南设得兰群岛的二叠世象海豹岛群主要出露 于史密斯岛、象海豹岛、克拉伦斯岛等岛屿,为含蓝 闪石的低温高压变质杂岩,是斯科舍弧变质杂岩 (Scotia Metamorphic Complex)的组成部分,为一套 深位俯冲-增生杂岩^[8],其形成与古太平洋俯冲-增 生作用有关^[8]。

晚三叠世迈尔斯陡崖组的岩性及构造沉积特 征是浊流沉积,三叠纪末受古太平洋板块俯冲的影 响,这一浊流地层发生褶皱、变形和隆升,是冈瓦纳 古陆在侏罗纪早期开始裂解前的一次重要构造事 件,在罗斯造山带称威德尔造山运动^[11]。

南设得兰群岛地区火山活动自白垩纪持续活 动至今,还伴有大量的基性-酸性岩浆侵入,形成与 南美安第斯山脉不仅连接,而且十分相似的中—新 生代岛弧岩浆带。白垩纪岩浆作用主要发生在西 南部的利文斯顿岛、格林尼治岛、罗伯特岛和纳尔逊 岛,到早中新世则迁移到东北部的乔治王岛,说明南 设得兰群岛火山活动在早白垩世—早中新世总体呈 现从西南向东北迁移的趋势,可能是被断裂分割的 洋底从西南向西北先后发生俯冲的结果[21,46]。

约4 Ma,随着洋脊扩张和古太平洋板块俯冲作 用的停止,已俯冲在南极半岛之下的板块继续下沉,

地目时代				迪塞	普申岛		利文斯顿岛		乔治王岛		地层柱
	吧云时代	4					依诺特角	梅尔维尔角	企我	粤岛	
the unit of	公车站					彭迪尤勒 姆组	依诺特角组			彼得雷尔 克雷特组	彭迪尤 勒姆组
	王胡玑		后火山 口组	霍克 斯群	庞德 山群	贝利角组		火山岩	企鹅岛群	迪肯峰组	贝利角组
		上更 新统				斯通斯罗 山脊组					斯通斯罗山脊组
书四 示	再车站	中更 新统			外岸凝灰 岩组						
	丈利玑	下更新统	前火山 口组	福斯 特群	福斯特 港群	 玄武岩地 盾组 富马罗尔 湾组 	-				马尔角组
参考文献		[58-59]	[60]		[61]	[28]	[5,37]	[56]		本文	

表 7 南设得兰群岛第四系对比 Table 7 Correlation of Quaternary stratigraphy in the South Shetland Islands



图 2 研究区部分地层特征 Fig. 2 Stratigraphy of the study area a-乔治王岛海狮岬早中新世枕状熔岩流;b-乔治王岛菲尔德斯半岛早始新世玄武岩柱状节理; c--罗伯特岛科珀曼半岛晚白垩世砾岩;d---史密斯岛北西侧产状近于直立的二叠纪蓝片岩 由于缺失扩张脊的推动力,使下沉板块回卷,最终 导致布兰斯菲尔德海峡弧后盆地的打开^[62]。布兰 斯菲尔德海峡的形成,不仅把南设得兰群岛向北西 推离南极半岛约 65 km,而且导致更新世以来的火 山喷发,具体表现为第四纪以来迪塞普申岛、企鹅 岛等在裂谷环境中以幔源碱玄武岩浆喷出的火山 活动^[63]。

4 结 论

(1)通过系统整理已有资料和成果,同时结合 野外考察及相应的地层结构和年代学数据,将南设 得兰群岛地层划分为24个岩石地层单元,建立了南 设得兰群岛中—新生代火山-沉积地层层序和年代 学格架。24个地层单元由老至新依次是:二叠系象 海豹岛群,上三叠统迈尔斯陡崖组,上侏罗统安克 雷奇组,下白垩统普雷斯登特滩组、斯塔特山组、切 斯特火山锥组、赛罗内格罗组和鲍尔斯山组,上白 垩统汉纳角组和帕拉代斯湾群,下始新统巴兰诺夫 斯基冰川群、埃斯库拉湾群和菲尔德斯半岛群,中 始新统埃内坎角群,上渐新统迪斯特拉克申湾组、 波罗内兹湾组和阿德默勒尔蒂湾群,下中新统梅尔 维尔角组、博伊角组和维瑟尔湾组,上上新统一中 更新统马尔角组,上更新统斯通斯罗山脊组,全新 统贝利角组和彭迪尤勒姆湾组。

(2)南设得兰群岛白垩纪—全新世火山活动均 有发生,群岛西南部主要出露下白垩统火山岩,而 东北部主要出露上白垩统—下中新统火山岩,说明 南设得兰群岛火山活动在早白垩世—早中新世总 体呈现从西南向东北迁移的趋势,可能是被断裂分 割的洋底从西南向西北先后发生俯冲的结果。第 四纪以来,伴随布兰斯菲尔德海峡的打开,在裂谷 环境中,形成了以幔源碱玄武岩浆喷发的迪塞普申 岛、企鹅岛等。

致谢:项目执行过程中得到中国地质调查局、 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、中国第29~34次南极科学考察队 等单位和个人的大力支持,中国地质科学院地质力 学研究所张拴宏、裴军令研究员,杜星星、郑光高、 胡娟、高亮博士等参加了野外考察,在此一并表示 感谢。

参考文献

[1] Weaver S D, Saunders A D, Tarney J. Mesozoic - Cenozoic volcanism

in the South Shetland Islands and the Antarctic Peninsula: geochemical nature and plate tectonic significance [C]//Craddock C. Antarctic geoscience.Madison: University of Wisconsin Press, 1982: 263–273.

- [2] 常李艳,华薇娜,李煜.通过国际南极论文分析南极研究现状[J].极 地研究,2010,22(2):174-189.
- [3] 位梦华.奇异的大陆-南极洲[M].北京: 地质出版社, 1986: 1-175.
- [4] 韦利杰.西南极乔治王岛新生代古生物特征及古环境探讨[J].地 质力学学报,2021,27(5):855-866.
- [5] 陈廷愚,沈炎彬,赵越,任留东.南极洲地质发展与冈瓦纳古陆演化[M]. 北京:商务印书馆,2008:1-372.
- [6] Gongzalez Ferran O. The Antarctic Cenozoic processes (review paper) [C]//Craddock C. Antarctic geoscience. Madison, University of Wisconsin Press, 1982: 687–694.
- [7] Rivano S, Cortéortno Saddock C. Antarctic Glawsonite sodic amphibole association on Smith Island, South Shetland Islands, Antarctica[J].Earth and Planetary Science Letters, 1976, 29: 34–36.
- [8] Tanner P W G, Pankhurst R J, Hyden G. Radiometric evidence for the age of the subduction complex in the South Orkney and South Shetland islands, West Antarctica[J].Journal of the Geological Society, 1982, 139: 683–690.
- [9] Pankhurst R J, Marsh P D, Clarkson P D. A geochronological investigation of the Shackleton Range[C]//Oliver R L, James P R, Jago J B. Antarctic Earth Science – Proceedings of the Fourth International Symposium on Antarctic Earth Science, Adelaide, South Australia, 16 – 20 August 1982. Canberra: Australian Academy of Science/Cambridge University Press, 1983: 176–182.
- [10] Hervéer, Loske W, Miller H, et al. Chronology of provenance, deposition and metamorphism of deformed fore – arc sequences, southern Scotia arc[C] //Thomson M R A, Crame J A, Thomson J W. Geological evolution of Antarctica. Cambridge University Press, Cambridge – New York, 1991: 429–435.
- [11] 沈炎彬, 邓希光, 欧阳舒, 等. 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, 2000, 24(4): 291-296.
- [12] Smellie J L, Panhurst R J, Thomson M R A, et al. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution [J]. British Antarctic Survey Scientific Report, 1984, 87: 1–85.
- [13] Thomson M R A.Late Jurassic fossils from Low Island, South Shetland Islands[J].British Antarctic Survey Bulletin, 1982, 56: 25–35.
- [14] Bastias J, Calderon M, Israel L, et al. 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, 2020, 62(11): 1467–1484.
- [15] Hathway B, Lomas S A. The upper Jurassic –lower cretaceous Byers group, South Shetland Islands, Antarctica: revised stratigraphy and regional correlations[J]. Cretaceous Research, 1998, 19: 43–67.
- [16] Crame J A, Pirrie D, Crampton J S, et al. Stratigraphy and regional significance of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous Byers Group, Livingston Island, Antarctica [J]. Journal of the Geological Society, 1993, 150: 1075–1087.

- [17] Duane A M. Preliminary palynological investigation of the Byers Group(Late Jurassic – Early Cretaceous), Livingston Island, Antarctic Peninsula[J].Review of Palaeobotany and Palynology, 1994,84: 113–120.
- [18] Duane A M. 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, 1996, 91: 241–281.
- [19] Haase K M, Beier C, Fretzdorff S, et al. Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation[J].Contribution to Mineralogy and Petrology, 2012, 163(6): 1103–1119.
- [20] Miller C A, Barton M, Hanson R E, et al. An Early Cretaceous volcanic arc/marginal basin transition zone, Peninsula Hardy, southernmost Chile [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1994, 63: 33–58.
- [21] 郑祥身, 桑海清, 裘冀, 等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, 1998, 10(1):1-10.
- [22] Hathway B, Duane A M, Cantrill D J, et al.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, 1999, 46: 593–606.
- [23] Smellie J L, Liesa M, Munoz J A, et al. Lithostratigraphy of volcanic and sedimentary sequences in central Livingston Island, South Shetland Islands[J]. Antarctic Science, 1995,7(1): 99–113.
- [24] Pankhurst R J, Weaver S D, Brook M, et al. K-Ar chronology of Byers Peninsula, Livingston Island, South Shet-land Islands[J]. British Antarctic Survey Bulletin, 1979, 49: 277–282.
- [25] Watts D R, Watts G C, Bramall A M. Cretaceous and early Tertiary paleomagnetic results from the Antarctic Peninsula [J]. Tectonics, 1984,3(3): 333–346.
- [26] 郑祥身,刘嘉麒,胡世玲,等.南设得兰群岛利文斯顿岛鲍勒斯山组火 山岩的⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄及地质意义[J].极地研究,1997,9(1):28-34.
- [27] 高亮,赵越,杨振宇,等.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,2015,34(6): 1109-1122.
- [28] Smellie J L, Pallas R, Sibat F, et al. Age and correlation of volcanism in central Livingston Island, South Shetland Islands: K – Ar geochemical constraints[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1996, 9 (3/4): 265–272.
- [29] Chapman J L, Smellie J L. Cretaceous fossil wood and palynomorphs from Williams Point, Livingston Island, Antarctic Peninsula [J]. Reviews of Palaeobotany and Palynology, 1992, 74: 163–192.
- [30] Nawrocki J,Panczyk M, Williams I S.Isotopic ages and palaeomagnetism of selected magmatic rocks from King George Island, Antarctic Peninsula[J].Journal of the Geological Society of London, 2010, 167: 1063–1079.
- [31] Rees P M, Smellie J L. Cretaceous Angiosperms from an Allegedly Triassic flora at Williams Point, Livingston Island, South Shetland Islands[J].Antarctic Science, 1989, 1(3): 239–248.

- [32] Dumont J F, Santana E, Hervéervnet al. Regional Structures and Geodynamic Evolution of North Greenwich (Fort Williams Point) and Dee Islands, South Shetland Islands [C] // Futterer D K, Damaske D, Kleinschmidt G, et al. Antarctica. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006: 255–260.
- [33] Shen Y B. Subdivision and correlation of Eocene Fossil Hill Formation from King George Island, West Antarctica [J]. Korean Journal of Polar Research, 1999, 10(2): 91–95.
- [34] Birkenmajer K.Geology of Admiralty Bay, King George Island(South Shetland Islands) – An outline[J].Polish Polar Research, 1980, 1: 29–54.
- [35] Nawrocki J, Panczyk M, Williams I S. Isotopic ages of selected magmatic rocks from King George Island (West Antarctic) controlled by magnetostratigraphy[J].Geological Quarterly, 2011, 55(4): 301–322.
- [36] Mozer A, Pecskay Z, Krajewski K P. Eocene age of the Baranowski Glacier Group at Red Hill, King George Island, West Antarctica[J]. Polish Polar Research, 2015, 36(4): 307–324.
- [37] Birkenmajer K.Oligocene-Miocene glacio-marine sequences of King George Island (South Shetland Islands), Antarctica [J]. Palaeontologia Polonica, 1987, 49: 9–36.
- [38] Gao L, Zhao Y, Yang Z Y, et al. New Paleomagnetic and ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar Geochronological Results for the South Shetland Islands, West Antarctica, and Their Tectonic Implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123: 4–30.
- [39] 沈炎彬.南极乔治王岛菲尔德斯半岛地层古生物研究初探[J].古 生物学报,1990,29(2):129-139.
- [40]李浩敏.南极乔治王岛菲尔得斯半岛早第三纪化石山植物 群[C]//沈炎彬主编.南极乔治王岛菲尔得斯半岛地层及古生物 研究.北京:科学出版社,1994:133-172.
- [41] 宋之琛.南极乔治王岛第三纪化石山组的孢粉植物群[J].微体古 生物学报,1998,15(4): 335-350.
- [42] Jacques F M B, Shi G L, Li H M, et al. An early-middle Eocene Antarctic summer monsoon: Evidence of 'fossil climates' [J]. Gondwana Research, 2014, 25(4): 1422–1428.
- [43] Kim H, Lee J I, Choe M Y, et al. Geochronologic evidence for Early Cretaceous volcanic activity on Barton Peninsula, King George Island, Antarctica[J].Polar Research, 2000, 19(2): 251–260.
- [44] Kraus S.Magmatic dyke systems of the South Shetland Islands volcanic arc (West Antarctica): Reflections of the geodynamic history [D]. Munich: University of Munich PhD thesis, 2005.
- [45] Zheng X, Sang H, Qiu J, et al. New discovery of the Early Cretaceous volcanic rocks on the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2000,74: 176–182.
- [46] Wang F, Zheng X S, Lee J I K, et al. An ⁴⁰ Ar/³⁹ 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, 2009, 10: 1–29. doi: 10. 1029/2009GC002874.
- [47] Dingle R V, Lavelle M. Antarctic Peninsula cryosphere: Early Oligocene(ca. 30Ma) initiation and a revised glacial chronology [J].

Journal of the Geological Society of London, 1998, 155: 433-437.

- [48] Troedson A L, Smellie J L. The Polonez Cove Formation of King George Island, Antarctica: stratigraphy, facies and implications for mid – Cenozoic cryosphere development[J].Sedimentology, 2002, 49: 277–301.
- [49] 邢光福,王德滋,金庆民,等.南极乔治王岛阿德默勒尔蒂湾火山 活动时空演化[J].极地研究,2002,14(1):22-34.
- [50] 李兆鼐,郑祥身,刘小汉,等.西南极乔治王岛菲尔德斯半岛火山 岩[M].北京:科学出版社,1992:1-227.
- [51]朱铭,鄂莫岚.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,1991,3(2):126-135.
- [52] Lee J I, Hur S D, Yoo C M, et al. Explanatory text of the geological Map of Barton and Weaver Peninsulas, King George Island, Antarctica [M]. Ansan: Korea Ocean Researchand Development Institute, 2002: 30.
- [53] Troedson A L, Riding J B. Upper Oligocene to lowermost Miocene strata of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica: stratigraphy, facies analysis, and implications for the glacial history of the Antarctic Peninsula[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72 (4): 510–523.
- [54] Birkenmajer K, Luczkowska E. Foraminiferal evidence for a Lower Miocene age of glaciomarine and related strata, Moby Dick Group, King George Island (South Shetland Islands, Antarctica) [J]. Studia Geologica Polonica, 1987, 90: 81–123.
- [55] Panczyk M, Nawrocki J. Pliocene age of the oldest basaltic rocks of Penguin Island(South Shetland Islands, northern Antarctic Peninsula) [J].

Geological Quarterly, 2011, 55: 335-344.

- [56] Birkenmajer K.Report on geological investigations on King George Island and Nelson Island(South Shetland Islands, West Antarctica) in 1980–81[J].Studia Geologica Polonica, 1982,74(3): 175–197.
- [57] Keller R A, Fisk M R, White W M, et al. Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin formation, Bransfield Strait, Antarctica[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 111: 287–303.
- [58] Smellie J L.Recent observations on the volcanic history of Deception Island, South Shetland Islands [J]. British Antarctic Survey Bulletin, 1988,81: 83–85.
- [59] Smellie J L. Deception Island [C]//Dalzieli W D. Tectonics of the Scotia arc, Antarctica. 28th International Geological Congress, Field Trip Guidebook T180. Washington, DC: American Geophysical Union, 1989: 146–152.
- [60] Birkenmajer K. Volcanic succession at Deception Island, West Antarctica: a revised lithoestratigraphic standard [J]. Studia Geologica Polonica, 1992, 101: 27–82.
- [61] Smellie J L. Lithostratigraphy and volcanic evolution of Deception Island, South Shetland Islands[J]. Antarctic Science, 2001, 73(2): 188–209.
- [62] 郑光高,刘晓春,赵越,等.南极半岛中新生代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,2015,34(6):1090-1102.
- [63] 刘嘉麒,张雯华,郭正府.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,2002,14(1):1-11.