

南极半岛中生代构造岩浆演化及与南美巴塔哥尼亚对比

郑光高^{1,2}, 刘晓春¹, 赵越¹

1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 为了解南极半岛中生代构造岩浆演化及其与南美巴塔哥尼亚的关系, 本文综述了南极半岛岩浆岩的分布、时代、岩石成因、构造环境以及巴塔哥尼亚的地质历史。南极半岛可划分出东部冈瓦纳、中部岩浆弧和西部增生杂岩的 3 个构造域, 古生代岩浆作用仅局部出现在东部和中部构造域, 而中生代岩浆作用形成的火山岩和侵入岩构成了中部岩浆弧的主体, 并且随时间在南极半岛从东南向西北逐渐迁移、在南设得兰群岛从西南向东北逐渐迁移。南极半岛中生代的构造演化包括了各构造域在侏罗纪汇聚前的大洋俯冲和岛弧增生、早白垩世各构造域初始汇聚和构造剥蚀、白垩纪中期碰撞造山、晚白垩世-早新生代 (~50 Ma 之前) 乔治六世海峡的形成以及 ~4 Ma 布兰斯菲尔德海峡弧后盆地的打开。南极半岛与巴塔哥尼亚的地质对比表明, 两地区至少在白垩纪以前是相连的。

关键词: 岛弧岩浆作用; 中生代; 南极半岛; 巴塔哥尼亚

中图分类号: P588.1 文章编号: 1007-2802(2015)06-1090-13 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2015.06.002

Mesozoic-Cenozoic Tectonomagmatic Evolution of the Antarctic Peninsula and Its Correlation with Patagonia of Southernmost South America

ZHENG Guang-gao^{1,2}, LIU Xiao-chun¹, ZHAO Yue¹

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

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: In order to understand the Mesozoic-Cenozoic tectonomagmatic evolution of the Antarctic Peninsula and its correlation with Patagonia of southernmost South America, this paper briefly overview the distribution, ages, petrogenesis and tectonic settings of magmatic rocks from the Antarctic Peninsula, and geological history of Patagonia. The Antarctic Peninsula region can be divided into three major tectonic domains: (1) the East Domain related to Gondwanaland, (2) the Central Domain composed by magmatic arc terrane, and (3) the West Domain that represents an accretion complex. The Paleozoic magmatic rocks only locally occurs in the East and Central Domains, while the Mesozoic-Cenozoic volcanic and intrusive rocks dominate the Central Domain. Moreover, the Mesozoic-Cenozoic magmatism gradually migrated with time from southeast to northwest in the Antarctic Peninsula and from southwest to northeast in the South Shetland Islands. During the Mesozoic and Cenozoic, the Antarctic Peninsula experienced multiple tectonic movements, including oceanic subduction and island-arc accretion before the Cretaceous convergence for all the three domains, the initial convergence and tectonic erosion among these domains in the Early Cretaceous, collisional orogeny in the mid-Cretaceous, the formation of the George VI Sound before ~50 Ma, and the opening of the Bransfield Strait back-arc basin at ~4 Ma. The geological comparison between the Antarctic Peninsula and Patagonia suggests that the two regions were connected at least before Cretaceous.

Key words: Arc magmatism; Mesozoic-Cenozoic; Antarctic Peninsula; Patagonia

在大地构造上, 一般将南极大陆划分为东南极地盾、西南极活动带和夹持于其间的横贯南极山脉等 3 个地质单元。西南极的陆地部分可进一步区分

出玛丽伯德地 (Marie Byrd Land)、埃尔斯沃斯山脉 (Ellsworth-Whitmore Mountains)、瑟斯顿岛 (Thurston Island) 和南极半岛 (Antarctic Peninsula) 等 4 个地块

收稿日期: 2015-08-14 收到, 2015-09-07 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41372082); 国家极地专项项目 (CHINARE2015-02-05)

第一作者简介: 郑光高 (1987-), 男, 博士研究生, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: tiangang755@163.com.

(Dalziel and Elliot, 1982; Storey and Garrett, 1988), 这些块体记录了西南极显生宙的增生造山历史。南极半岛地区是一个中生代活动带, 主要由石炭纪—三叠纪浅变质弧前盆地沉积岩或增生杂岩、中生代变质杂岩以及侏罗纪—古近纪碎屑岩和火山岩构成, 中侏罗世—古近纪大规模的火山喷发还伴有大量的基性-酸性岩浆侵入, 从而形成与南美巴塔哥尼亚安第斯山脉相连的中-新生代构造岩浆带。本文详细总结和评述了南极半岛地区岩浆岩(包括火山岩和侵入岩)的分布、时代、岩石成因、构造环境及构造演化历史, 并通过与南美南部巴塔哥尼亚(Patagonia)的地质历史对比来探索二者之间的地质联系。

1 区域地质背景

基于东帕默地(Eastern Palmer Land)韧性剪切带的发现, Vaughan 和 Storey (2000) 将南极半岛地区划分出 3 个构造域, 即东部构造域、中部构造域和西部构造域(图 1), 三者到晚侏罗世—早白垩世碰撞造山事件中汇聚在一起。

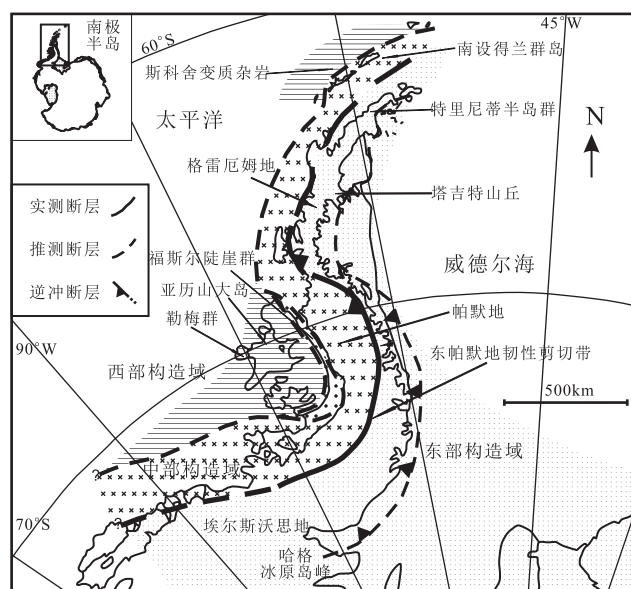


图 1 南极半岛大地构造分区简图

(据 Vaughan and Storey, 2000 修改)

Fig.1 Schematic tectonic division map of the Antarctic Peninsula (modified after Vaughan and Storey, 2000)

1.1 东部构造域

东部构造域(地体)位于南极半岛东侧, 从帕默地(Palmer Land)向北连续延伸至格雷厄姆地(Graham Land), 地理位置上邻近冈瓦纳古陆的核心, 具有准原地的性质(Kellogg and Rowley, 1989)。

东部构造域出露最广泛亦是最古老的地层为晚石炭世—晚三叠世特里尼蒂半岛群(Trinity Peninsula Group)的浊积岩(Smellie and Millar, 1995), 其产出环境类似于增生楔, 经历了晚三叠世—早侏罗世变形作用的改造(Storey and Garrett, 1985)。其他中生代沉积岩系, 包括早侏罗世博特尼湾群(Botany Bay Group)陆源泥岩/砂岩序列, 不整合在特里尼蒂半岛群之上(Farquharson, 1982, 1984)。上覆于早中侏罗世陆相沉积岩之上的侏罗纪南极半岛火山群(Antarctic Peninsula Volcanic Group)分布广泛(Thomson and Pankhurst, 1983; Riley and Leat, 1999), 而中晚侏罗世的花岗质深成岩体切穿了南极半岛火山群的火山岩系和博特尼湾群的沉积岩系(Pankhurst *et al.*, 2000)。

1.2 中部构造域

中部构造域与东部构造域以东帕默地韧性剪切带为界, 其主体由中生代以及一些可能更老的火山岩和侵入岩构成。该构造域中出露的最古老变质沉积岩为角闪岩相云英片岩和石榴黑云斜长片麻岩(Wendt *et al.*, 2008), 它们是早侏罗世或更老俯冲杂岩的一部分(Meneilly, 1988)。最老的岩浆岩是晚三叠世含钾长石巨晶的花岗岩类和层状花岗质片麻岩, 中侏罗世辉长岩-花岗岩套侵入于片麻岩中(Wever *et al.*, 1994; Scarrow *et al.*, 1996; Vaughan and Storey, 2000)。火山岩主要包括晚侏罗世前变形的安山质凝灰岩、熔岩以及未变质的侏罗纪和更年轻的南极半岛火山群钙碱性凝灰岩和熔岩(Thomson and Pankhurst, 1983; Davies, 1984)。在东帕默地, 晚侏罗世—早白垩世埃达克质岩石侵入到三叠纪和侏罗纪的片麻岩和岩浆岩中(Vaughan *et al.*, 1997, 1998; Wareham *et al.*, 1997)。该构造域经历了晚侏罗世—早白垩世挤压和晚白垩世伸展两期变形事件的影响(Vaughan *et al.*, 1997, 1998)。

1.3 西部构造域

西部构造域主要包括南极半岛南部的亚历山大岛(Alexander Island)和北部的南设得兰群岛(South Shetland Islands), 其中亚历山大岛以一个新生代裂谷带—乔治六世海峡(George VI Sound)与中部构造域分隔(Bell and King, 1998)。亚历山大岛的中生代地壳主要由弧前岩石组成, 可划分为四个地质单元(McCarron and Millar, 1997)。(1)勒梅群(LeMay Group), 为一套从古生代到白垩纪沉积的变质变形俯冲-增生杂岩, 构成了亚历山大岛的基底, 古近纪火山岩上覆在这套俯冲-增生杂岩之上(McCarron and Larter, 1998); (2)福斯尔陡崖群

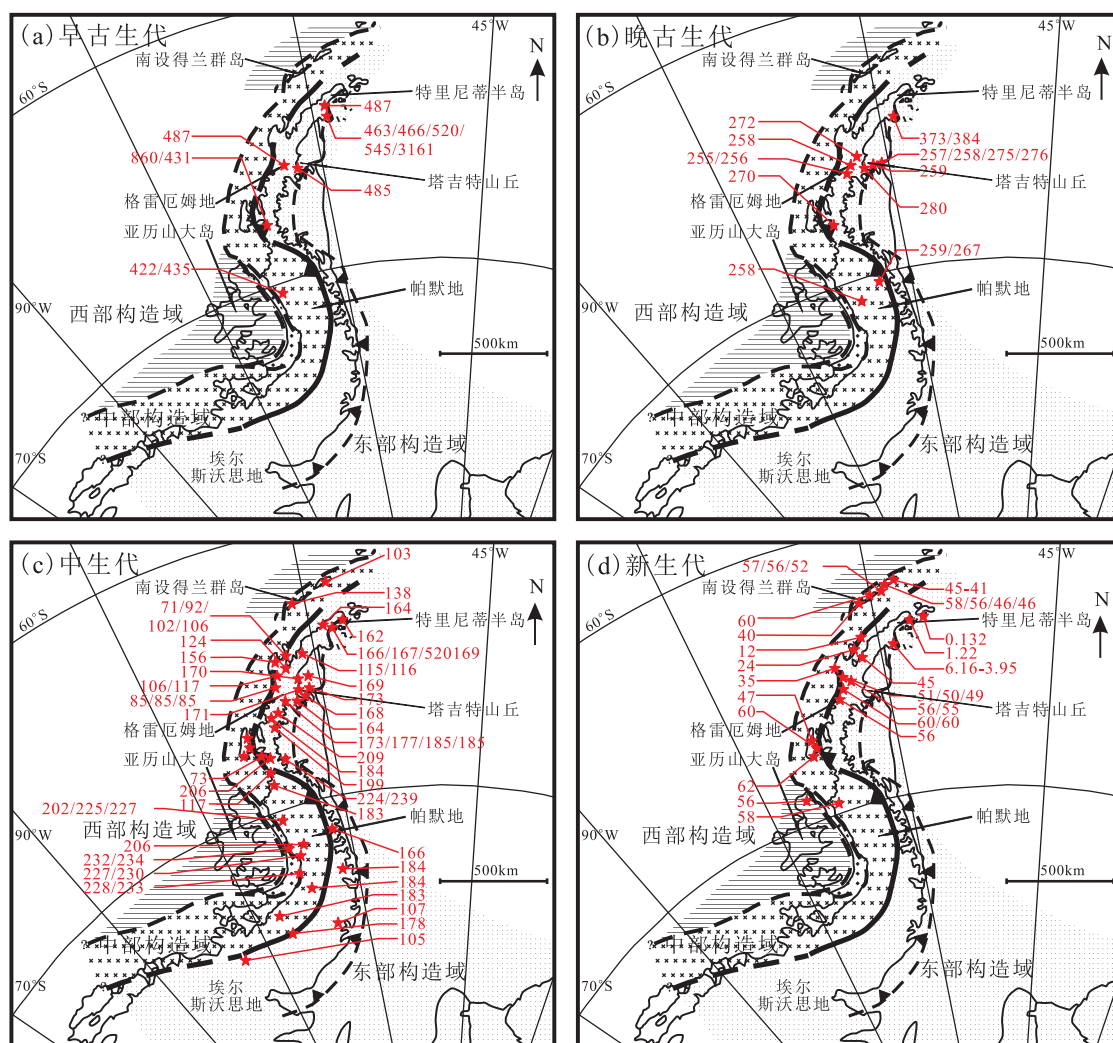
(Fossil Bluff Group), 为中侏罗世-早白垩世弧前盆地沉积形成的浅海相-近地表河流相砂岩和砾岩 (Macdonald and Butterworth, 1990); (3) 弧前出露的晚白垩世-古近纪火山岩和花岗岩类 (McCarron and Larter, 1998); (4) 少量新近纪 (≤ 7 Ma) 碱性火山岩露头, 形成于俯冲作用停止之后 (Hole *et al.*, 1991)。南设得兰群岛的斯科舍变质杂岩 (Scotia Metamorphic Complex) 为一套深位俯冲-增生杂岩, 其变质条件达蓝片岩-角闪岩相 (Trouw *et al.*, 1998)。

2 古生代岩浆岩

2.1 古生代岩浆岩的分布及时代

南极半岛古生代岩石主要出露在南帕默地和

埃尔斯沃思地东部 (图 2a, 2b)。Millar 等 (2002) 曾在北东帕默地维尤角 (View Point) 特里尼蒂半岛群的一个鹅卵石中获得锆石 U-Pb 上交点年龄为 3161 ± 13 Ma, 这是在西南极所获得的最老年龄, 但该年龄的出现并不代表太古宙古老基底的存在。早古生代的岩浆岩主要包括出露于东格雷厄姆地伊登冰川 (Eden Glacier) 和约尔格半岛 (Joerg Peninsula) 的奥陶纪闪长质片麻岩 (487 ± 3 Ma 和 485 ± 3 Ma) 和花岗岩 (476 ± 18 Ma) 以及北西帕默地艾辛格山 (Mount Eissenger) 的志留纪灰色片麻岩 (435 ± 8 Ma) 和条带状正片麻岩岩基 (422 ± 18 Ma), 类似年龄的火山岩和花岗岩碎屑也有所报道 (Tangeman and Mukasa, 1996; Millar *et al.*, 2002; Bradshaw *et al.*, 2012; Riley *et al.*, 2012a)。塔吉特山丘 (Target Hill)



(a) 早古生代岩浆岩; (b) 晚古生代岩浆岩; (c) 中生代岩浆岩; (d) 新生代岩浆岩; 数据来源于 Loske and Miller, 1991; Leat *et al.*, 1995, 2009; Tangeman and Musksa, 1996; McCarron and Millar, 1997; Pankhurst *et al.*, 2000; Millar *et al.*, 2002; Vaughan *et al.*, 2002, 2012b; Flowerdew *et al.*, 2005, 2006; Hunter *et al.*, 2005, 2006; Kristjánsson *et al.*, 2005; Hervé *et al.*, 2006; Smellie *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2009; Bradshaw *et al.*, 2012; Haase *et al.*, 2012; Riley *et al.*, 2012a, 2012b; Veevers and Saeed, 2013

图 2 南极半岛不同时代岩浆岩锆石 U-Pb 和全岩 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄分布图

Fig.2 The distribution of different igneous rocks zircon U-Pb and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ age in the Antarctic Peninsula

变质杂岩通常被认为是南极半岛的古老基底杂岩, 泥盆、石炭和二叠纪的原岩和变质年龄已由锆石 U-Pb 定年方法很好地限定, 其中泥盆纪侵入岩的原岩结晶年龄大约在 400~370 Ma, 石炭纪淡色花岗岩的侵位年龄为 327 ± 9 Ma (Millar *et al.*, 2002; Riley *et al.*, 2012a)。二叠纪岩浆岩遍布于帕默地和格雷厄姆地, 时代约为 280~255 Ma, 岩性则包括闪长质片麻岩、花岗闪长岩、花岗岩、混合岩和淡色体等 (Millar *et al.*, 2002; Flowerdew *et al.*, 2006; Riley *et al.*, 2012a)。

2.2 古生代岩浆岩形成的构造环境

尽管南极半岛总体上是一个中新生代活动带, 但从奥陶纪到二叠纪正片麻岩和各种花岗岩类岩石的存在说明该活动带发育在古老地壳基底之上, 因其裂解演化而成。特里尼蒂半岛群的沉积岩中含有大量的古生代碎屑锆石年龄, 表明其来自于西冈瓦纳古陆裂解之前的物源区。虽然在古生代岩浆岩中尚无地球化学资料可以利用, 但由于这些早期的侵入体一般多伴有变质事件的发生 (Millar *et al.*, 2002; Wendt *et al.*, 2008; Riley *et al.*, 2012b), 所以可能是冈瓦纳大陆边缘增生造山作用的结果。

3 中生代岩浆岩

3.1 中生代岩浆岩的分布及时代

中生代岩浆侵入和火山作用在南极半岛非常普遍 (图 2c), 所形成的火山岩和深成侵入体在地表的出露比例近似相等。南极半岛的火山岩被统称为南极半岛火山岩群 (Thomson and Pankhurst, 1983), 主要由钙碱性系列的基性-酸性熔岩、火山碎屑岩和熔结凝灰岩等组成, 时代从侏罗纪一直延续到新生代 (190~10 Ma), 其中侏罗纪地层主要包括早侏罗世的波斯特山组 (Mount Poster Formation)、布伦内克组 (Brenneke Formation) 和中侏罗世的梅普尔组 (Mapple Formation), 而侏罗纪之前主要以岩浆侵入活动为主。

约尔格半岛铁镁质正片麻岩中花岗质淡色伟晶岩的锆石核部和边部 U-Pb 加权平均年龄分别为 239 ± 8 Ma 和 224 ± 4 Ma, 后者反映了伟晶岩的形成时代。该地面理化黑云母花岗岩的锆石边部 U-Pb 年龄为 236 ± 2 Ma, 也代表其侵位时间 (Riley *et al.*, 2012a)。在帕默地西北部坎贝尔山脊 (Campbell Ridge) 和艾辛格山等几处片麻岩中获得的锆石 U-Pb 年龄也主要集中在 225~233 Ma 和 202 Ma, 反映该区中晚三叠世有两期明显的岩浆和高级变质作用 (Millar *et al.*, 2002)。在帕默地西北部的猎户座山地 (Orion

Massif), 灰色片麻岩 (258 ± 2 Ma) 穿插有淡色脉体 (206 Ma), 表明片麻岩基岩在晚古生代结晶形成, 并在三叠纪经历了熔融 (Millar *et al.*, 2002)。

科尔半岛 (Cole Peninsula) 和伊登冰川等地中酸性侵入体中的锆石记录了早侏罗世 (184 Ma) 的岩浆结晶时代 (Riley *et al.*, 2012a), 且在梅普尔冰川 (Mapple Glacier) 有中侏罗世 (168 ± 1.7 Ma) 花岗岩体侵入到梅普尔组熔结凝灰岩中 (Pankhurst *et al.*, 2000), 说明南极半岛在中生代存在多期岩浆作用。Hunter 和 Cantrill (2006) 和 Pankhurst 等 (2000) 对南极半岛出露的火山岩进行了锆石 U-Pb 年龄研究, 发现南部的帕默地地区火山作用时代集中在早侏罗世, 而北部的格雷厄姆地地区火山作用集中在中侏罗世, 反映出侏罗纪火山活动在南极半岛上有从南向北迁移的趋势。

白垩纪侵入和火山作用主要集中在帕默地西岸和南设得兰群岛一带。在帕默地南部, 在超过 100×800 km² 面积范围内广泛分布有早白垩世的拉西特海岸侵入岩套 (Lassiter Coaster Intrusive Suite) (Vennum and Rowley, 1986), 该岩套的岩性从辉长岩变化到花岗岩, 并以花岗闪长岩占主导地位, 变质程度可达角闪岩相 (Vaughan *et al.*, 2012b)。在南极半岛南部的豪伯格山 (Hauberg Mountains), 发育在拉西特海岸侵入岩套内的细小花岗岩脉锆石 U-Pb 年龄为 107 ± 1 Ma, 反映帕默地事件应发生在白垩纪中期, 而非晚侏罗世—早白垩世 (Vaughan *et al.*, 2002)。

3.2 中生代岩浆岩的地球化学特征

早侏罗世波斯特山组火山岩以流纹岩为主, 可以分成高 Ti ($\text{TiO}_2 > 0.7\%$, $\text{SiO}_2 = 70\% \sim 74\%$) 和低 Ti ($\text{TiO}_2 < 0.4\%$, $\text{SiO}_2 > 76\%$) 两组, 且高 Ti 组常出露于破火山口内部, 而低 Ti 组出露在破火山口外部 (Riley *et al.*, 2001)。研究表明, 高 Ti 流纹岩微量元素的变化是斜长石分馏的结果, 而低 Ti 流纹岩相对于高 Ti 组具有高 Sr、低 Eu/Eu^* 值的特点, 表明低 Ti 流纹岩与斜长石的分馏无关。岩石的稀土元素 (REE) 变化不大, 但高 Ti 流纹岩呈现出轻稀土 (LREE) 富集、中等程度的负 Eu 异常以及平坦的重稀土 (HREE), 而低 Ti 流纹岩 LREE 富集程度变化较大, 且负 Eu 异常明显 (Riley *et al.*, 2001)。岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化较大 ($0.7106 \sim 0.7206$), ϵ_{Nd} 值为 $-2.4 \sim -7.8$, 其中高 Ti 组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7180 \sim 0.7206$, ϵ_{Nd} 为 $-6.9 \sim -7.8$, 而低 Ti 组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7106 \sim 0.7156$, ϵ_{Nd} 为 $-2.4 \sim -4.9$ 。东帕默地附近的

布伦内克组流纹质和英安质火山岩与其具有相似的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 (0.7078~0.7157) 和 ε_{Nd} (-4.3~-7.7) 值 (Riley *et al.*, 2001)。

中侏罗世梅普尔组火山岩同样可以分成高 Ti 和低 Ti 两组, 其中高 Ti 组 ($\text{TiO}_2 = 0.68\% \sim 1.00\%$) 以中等含量的 SiO_2 ($\text{SiO}_2 = 62\% \sim 67\%$) 为特征, 低 Ti 组 ($\text{TiO}_2 = 0.02\% \sim 0.56\%$) 以英安岩和流纹岩为主 ($\text{SiO}_2 = 64\% \sim 77\%$) (Riley *et al.*, 2001)。火山岩中微量元素的变化是以斜长石为主的分离结晶作用所引起。低 Ti 组稀土元素均匀, 都呈现出轻稀土富集和显著的负 Eu 异常, 且都是下凹式的中稀土到重稀土的配分模式。高 Ti 组的稀土配分模式更加平缓, 伴有少量的负 Eu 异常及不明显的轻稀土富集 (Riley *et al.*, 2001)。安山-流纹岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值可分为 3 个亚组: 高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 亚组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7070~0.7074, ε_{Nd} 为 -3.4~-3.6, 其 SiO_2 含量为 70%~76%; 中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 亚组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7065~0.7067, ε_{Nd} 为 -2.4~-3.4, 且包括低 Ti 和高 Ti 两组组分; 低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 亚组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7062~0.7065, ε_{Nd} 为 -2.2~-2.8 (Riley *et al.*, 2001)。

Leat 等 (1995) 收集了出露在南极半岛上的 71 个早白垩世侵入岩体的地球化学分析数据, 并将其分成如下 3 组: (1) SiO_2 为 55%~78% 的系列, 其岩性主要为石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩。该系列中 SiO_2 含量小于 58% 的样品与其他样品相比具有明显的高 P 或高 Ti 的特征。MgO 的含量一般小于 5%, 且随着 MgO 的递减, FeO 并未富集, 形成了钙碱性分离趋势。(2) 铁镁质硅饱和系列 ($\text{SiO}_2 = 48\% \sim 59\%$), 由脉体和花岗闪长岩中的包体组成, 具有较高的全碱、Na/K 和 Sr 值以及低的 Ca、Th 值。(3) SiO_2 含量小于 45% 的镁铁质堆积

体, 其低 P、Si 特征表明该堆积体的成因与第 2 组的镁铁质岩石有关。镁铁质硅饱和系列与中酸性岩系相比, 具有较高的 ε_{Nd} 值和相似的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 中酸性岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值并没有随 SiO_2 的增加而增加, 推测硅质上地壳岩石的同化作用在岩石成因上并未起主要作用。然而, 在相似的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值下, 镁铁质系列的 ε_{Nd} 值明显高于硅质中性系列。同时, 南极半岛早白垩世的岩基与白垩纪的 MORB 亏损地幔相比, Sr 同位素比值明显具有高放射性, 而 Nd 同位素明显具有低放射性。

3.3 中生代岩浆岩形成的构造环境

南极半岛中生代岩浆岩为以中酸性为主的基性-中性-酸性序列, 富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、K), 相对亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti), 这些特征与形成于俯冲带之上的岛弧岩浆岩的地球化学特征相类似 (McCulloch and Gamble, 1991)。早侏罗世波斯特山组火山岩 Sr、Nd 同位素比值清晰表明在其形成过程中有明显的壳源组分的加入。笔者对 Riley 等 (2001) 所测得的中生代安山质-流纹质火山岩的地球化学数据进行了投影 (图 3), 其中在 Nb-Y 图解中, 绝大多数火山岩样品落在岛弧-同碰撞带区; 在 Rb-Y+Nb 图解中, 绝大多数样品都投在岛弧区。显然, 这些岩石均形成于岛弧环境, 所有样品的投点非常集中, 反映出微量元素的初始富集没有被后期的蚀变和变质作用所改造。总之, 南极半岛中生代岩浆弧的形成与古太平洋洋底板块沿着南极半岛西缘海沟向东的俯冲作用有关。

4 新生代岩浆岩

4.1 新生代岩浆岩的分布及时代

南极半岛出露的新生代岩浆岩主要是古近纪

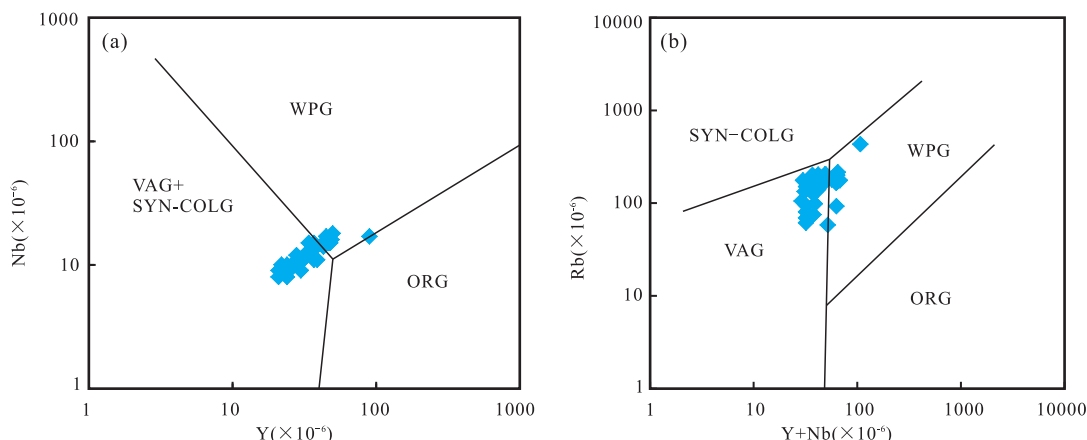


图 3 南极半岛中生代中酸性火山岩的 Nb-Y (a) 和 Rb-Y+Nb (b) 构造环境判别图解

Fig.3 Discrimination diagrams of Nb-Y (a) and Rb-Y+Nb (b) for tectonic settings of the Antarctic Peninsula Mesozoic volcanic rock

火山岩和侵入岩,其主要分布在南极半岛西部的离岸岛屿、南设得兰群岛和亚历山大岛(图 2d)。此外,在詹姆斯·罗斯岛(James Ross Island)、布拉班特岛(Brabant Island)和迪塞普申岛(Deception Island)还产出有新近纪晚期火山岩。

在南设得兰群岛出露的古近纪火山岩以乔治王岛(King George Island)的菲尔德斯半岛(Fildes Peninsula)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。前人的研究表明,纳尔逊岛(Nelson Island)东部火山岩年龄为 66 ± 23 Ma 和 56 ± 1 Ma,波特半岛(Potter Peninsula)法尔兹组(Fildes Formation)火山岩年龄为 47.6 ± 0.2 Ma (Haase *et al.*, 2012)。在乔治王岛的巴顿半岛(Barton peninsula)和韦弗半岛(Weaver peninsula)地区,玄武质、安山质熔岩和花岗岩类深成体在 $45 \sim 44$ 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,尚有待进一步证实(Wang *et al.*, 2009)。我们对南极半岛西部布斯岛(Booth Island)和古迪耶岛(Goudier Island)的闪长岩、花岗闪长岩和辉绿玢岩脉进行了 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得的主要年龄集中在 $60 \sim 55$ Ma 之间(未发表资料),说明南极半岛在古近纪早期也经历了一次重要的岩浆侵入活动。

亚历山大岛出露的岩性以中生代增生杂岩组成的变质沉积岩系和局部枕状熔岩及相关燧石为主,在古太平洋板块沿南极半岛俯冲作用停止之后,亚历山大岛出露有新生代的碧玄武岩、碱玄武岩和碱性橄榄玄武岩组合。在亚历山大岛北部地区,古近纪花岗岩侵入到增生杂岩中,时代为 56 ± 3 Ma (McCarron and Millar, 1997)。

在南极半岛东部出露的新生代火山侵入岩体统称为詹姆斯·罗斯岛火山群(James Ross Island Volcanic Group)(Nelson, 1975),由大量的熔岩深成体和成分类似的拉斑玄武岩、碱性玄武岩、夏威夷岩及少量的碧玄武岩、橄榄粗安岩等组成(Smellie, 1999)。詹姆斯·罗斯岛是詹姆斯·罗斯岛火山群出露最大的露头,主要岩性是碎屑角砾、枕状熔岩和近地面的熔岩流等。根据玄武岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,已确定出布兰迪湾(Brandy Bay)地区绝大多数玄武岩的形成时间在 $3.95 \sim 6.16$ Ma 之间(Kristjánsson *et al.*, 2005)。邓迪岛(Dundee Island)珀维斯角(Cape Purvis)和七扶垛(Seven Buttresses)火山岩年龄在 1.69 ± 0.03 Ma 到 0.132 ± 0.019 Ma 之间,证实了詹姆斯·罗斯岛火山岩群的活动一直

持续到新近纪晚期(Smellie *et al.*, 2006)。

4.2 新生代岩浆岩的地球化学特征

乔治王岛的菲尔德斯半岛古近纪玄武岩类的 SiO_2 含量一般为 $48\% \sim 55\%$,具有富 Al_2O_3 、高 CaO 、低 MgO 、 FeO 和 TiO_2 的特征,其硅碱指数为 $0.79 \sim 2.65$,且绝大多数样品小于 1.8(金庆民等, 1988; 李兆鼎等, 1992)。与南设得兰群岛玄武岩相比,菲尔德斯半岛玄武安山岩硅和碱质平均值略低, FeO 、 MgO 含量相近,但 Al_2O_3 和 CaO 则明显偏高。巴顿半岛和韦弗半岛上的玄武岩和玄武质岩石 SiO_2 含量为 $45\% \sim 51\%$, Al_2O_3 和 TiO_2 含量分别为 $16.6\% \sim 18.5\%$ 和 $0.6\% \sim 0.8\%$, Na_2O 和 K_2O 含量一般分别少于 4.0 和 1.5%,且都具有高度富 FeO 、中度富 MgO 的特征(Wang *et al.*, 2009)。玄武岩和玄武质岩石均具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征,并普遍发育弱的负 Eu 异常,其中高铝玄武岩的弱负 Eu 异常反映了岩浆经历了一定程度的斜长石分离结晶(邢光福, 2003)。乔治王岛古近纪火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7032 \sim 0.7039$, ϵ_{Nd} 为 $2.8 \sim 7.3$ (主要集中在 $5.0 \sim 7.0$)(Smellie *et al.*, 1984; 郑祥身等, 1988; 李兆鼎等, 1992; Keller *et al.*, 1992; 邢光福等, 1997; 邢光福, 2003; Wang *et al.*, 2009)。

乔治王岛的巴顿半岛和韦弗半岛上的花岗闪长岩和闪长岩侵入岩样品的 SiO_2 含量分别为 62% 和 51%, Al_2O_3 含量分别为 16.4% 和 19.0, TiO_2 含量分别为 0.5% 和 0.7%, Na_2O 含量分别为 3.9% 和 5.0, K_2O 含量分别为 2.7% 和 1.1%。这些样品都具有 SiO_2 含量随 MgO 含量的增加而减少,而 FeO 和 Al_2O_3 含量随 MgO 含量的增加而增加的趋势。它们具有与玄武岩和玄武质岩石同样的稀土富集规律,但富集程度更强,其中花岗闪长岩具有明显的负 Eu 异常(Wang *et al.*, 2009)。花岗闪长岩和闪长岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 ϵ_{Nd} 值与玄武岩、玄武质安山岩一致,分别为 $0.7033 \sim 0.7039$ 和 $5.4 \sim 7.3$,反映出该岛上的火山岩和侵入岩具有相同的地幔来源(Wang *et al.*, 2009)。

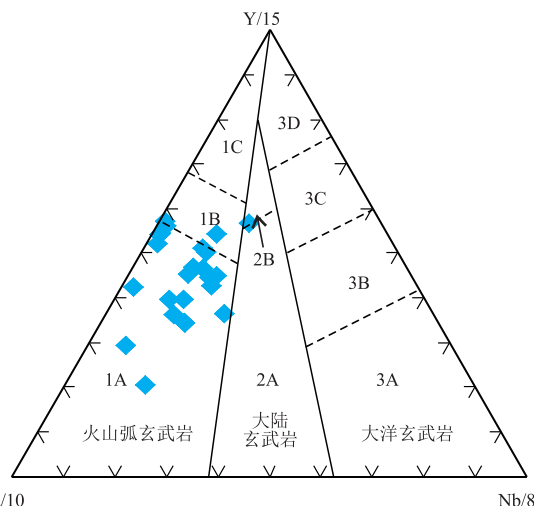
亚历山大岛玄武岩以高 MgO 含量($8.5\% \sim 11.2\%$)为特征, MgO 在碱玄武岩和橄榄玄武岩中的含量为 $6.5\% \sim 8.5\%$ 。有关亚历山大岛火山岩中的不相容微量元素,其富集规律有:橄榄玄武岩 < 碱性玄武岩 < 碱玄武岩 < 碧玄武岩,且碱性橄榄玄武岩和碱玄武岩比碧玄武岩具有更高的 Zr/Nb 和 Sr/Nb 值(陈廷恩等, 2008)。玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别限制在 $0.7028 \sim 0.7034$ 和 $0.5129 \sim 0.5130$ 范围内。碱性玄武岩和碧玄武岩几乎具有相同的 Sr、Nd 同位素

组分 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7030$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5130$), 橄榄玄武岩与其他玄武岩相比具有更强的放射性 Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7034$) 和更弱的放射性 Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5129$) (陈廷愚等, 2008)。中性至硅质的岩石具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (Pankhurst, 1982), 且接近于软流圈值, 由此推测它们包含有大量的来源于玄武质岩浆的组分 (Hole *et al.*, 1991)。

詹姆斯·罗斯岛火山岩群岩石的 Na_2O 和 K_2O 含量一般分别低于 4.0% 和 1.5%, 其 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值比南设得兰群岛火山岩高, 且在低 SiO_2 含量情况下, 火山岩群的 K_2O 含量类似于来自布兰斯菲尔德海峡 (Bransfield Strait) 碱性玄武岩的含量 (Kořler *et al.*, 2009)。詹姆斯·罗斯岛火山岩群玄武岩富集不相容元素, 其微量元素配分曲线明显与 N-MORB 和 E-MORB 的配分曲线不同, 而与 OIB 组分类似 (显著的 Rb、Ba、Th 和 P 亏损), 但熔岩的重稀土配分模式与 OIB 组能明显的区分出来 (Kořler *et al.*, 2009)。詹姆斯·罗斯岛火山群大部分的玄武岩中的 Sr、Nd 和 Pb 同位素组分基本相同, 即 ε_{Sr} 值在 $-19 \sim -21$, ε_{Nd} 值在 $4.4 \sim 5.2$ 。大部分岩石的 Sr 和 Nd 同位素组分与南极半岛的碱性火山岩相一致, 或者跨越了南极半岛碱性火山岩的同位素组分 (Hole *et al.*, 1993) 与南设得兰群岛和布兰斯菲尔德海峡东部碱性火山岩同位素组分的边界。Pb 同位素组分与南设得兰群岛和布兰斯菲尔德海峡的火山岩相比, 具有更强的放射性 (Kořler *et al.*, 2009)。

4.3 新生代岩浆岩形成的构造环境

南极半岛新生代古近纪岩浆岩为以中基性为主的基性-中性-酸性连续序列, 与中生代岩浆岩相比, 同样富集大离子亲石元素, 相对亏损高场强元素, 具有岛弧岩浆岩的地球化学特征。然而, 南极半岛古近纪岩浆岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低, ε_{Nd} 均为正值, 说明其原始岩浆来源于地幔的部分熔融, 且后期经历了分异过程。笔者对李兆鼎等 (1992) 和 Wang 等 (2009) 所测得的古近纪玄武质岩石的地球化学数据进行分析投图 (图 4), 在 La-Y-Nb 图解中主要落在钙碱性玄武岩及其与火山弧玄武岩的重叠区域, 进一步说明其形成于岛弧环境。新近纪晚期在詹姆斯·罗斯岛、布拉班特岛和迪塞普申岛形成的火山岩主要形成于菲尼克斯 (Phoenix) 板块沿南极半岛西缘俯冲的同期及俯冲停止后的弧后伸展背景之中 (Smellie, 1999; Skilling, 2002), 与布兰斯菲尔德海峡和热尔拉什海峡 (Gerlache Strait) 的打开及帕默地从亚历山大岛彻底的分离相伴 (Storey and Garrett, 1985)。



1.A-钙碱性玄武岩; 1C-火山弧玄武岩; 1B-A 和 1C 的重叠区域; 2A-大陆玄武岩; 2B-弧后盆地玄武岩; 3A-大陆裂谷碱性玄武岩; 3B-C-E 型洋中脊玄武岩; 3D-N 型洋中脊玄武岩; 底图据 Cabanis and Lecolle, 1989; 数据来源于李兆鼎等, 1992; Wang *et al.*, 2009

图 4 南极半岛新生代古近纪玄武质岩石的 La-Y-Nb 构造环境判别图解

Fig.4 Discrimination diagrams of La-Y-Nb for tectonic settings of the Antarctic Peninsula basaltic rock in Eocene of Cenozoic

5 南极半岛中新世构造演化

5.1 各构造域合并前的演化史 (侏罗纪, 图 5a)

如前所述, 南极半岛可以划分成东部、中部和西部 3 个构造域, 东部构造域为冈瓦纳古陆的准原地地体, 中部和西部构造域可能为外来地体。岩浆侵入作用伴随着火山作用在侏罗纪广泛发生, 并且火山作用主要发生在南极半岛的东部构造域。由此推测, 古太平洋持续俯冲到东部构造域之下, 导致了侏罗纪的连续火山作用。与此同时, 西/中部构造域与东部构造域之间被古太平洋所分隔, 并在东部构造域的西部因增生作用形成了一套增生杂岩。西部构造域是古太平洋俯冲在中部构造域之下形成的增生杂岩体 (Vaughan and Storey, 2000)。

5.2 各构造域初始合并及构造剥蚀 (早白垩世, 图 5b)

在早白垩世, 西/中部构造域与东部构造域初始合并, 但在中部构造域与东部构造域接触部位, 未能找到古太平洋俯冲在东部构造域之下所形成的增生杂岩, 推测在西/中部构造域与东部构造域合并之后发生了软碰撞事件 (Vaughan and Storey, 2000), 使得所产生的增生杂岩全部消耗殆尽。东部构造域在此阶段经历了构造剥蚀, 使得在东部构造域东部形成了拉森 (Larsen) 盆地和拉塔迪 (Latady) 盆地。

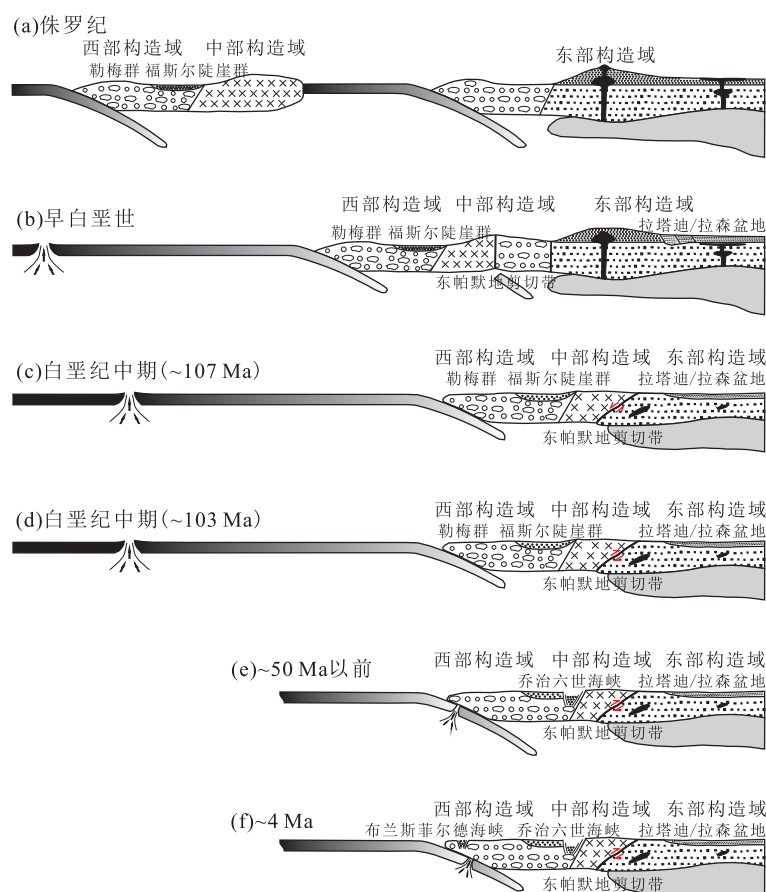


图5 南极半岛中生代构造演化模型(据 Vaughan and Storey, 2000 修编)

Fig.5 Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution model of the Antarctic Peninsula (modified after Vaughan and Storey, 2000)

5.3 帕默地事件(白垩纪中期,图 5c,5d)

南极半岛西/中部构造域与东部构造域在中白垩纪发生硬碰撞(Vaughan and Storey, 2000),碰撞挤压导致中部构造域与东部构造域的缝合带(东帕默地剪切带)发生两期构造事件,即帕默地造山事件。帕默地造山事件第1阶段发生在~107 Ma,构造形迹为纯剪切缩短到左行剪切挤压,在南极半岛广泛发育,但在帕默地南部表现最为明显(Vaughan *et al.*, 2012a)。第2阶段发生在~103 Ma,构造形迹为纯剪切缩短到右行剪切挤压,主要沿东帕默地剪切带发育。拉西特海岸侵入岩套的岩浆侵位事件可能在第1阶段达到高峰,而第2阶段则可能是岩浆作用的平息时期(Vaughan *et al.*, 2012a)。

5.4 乔治六世海峡的形成(晚白垩世—早新生代,~50 Ma 以前,图 5e)

南极—菲尼克斯板块扩张脊随时间从南极半岛西岸南部向北部迁移,导致大部分的非尼克斯板块俯冲在南极半岛陆缘西岸之下(Larter and Barker, 1991, 2002; Yegorova *et al.*, 2011)。在~50 Ma 以前,南极—菲尼克斯扩张脊首先到达亚历山大岛海沟部

位,并与海沟发生碰撞,导致洋脊扩张和菲尼克斯板块俯冲全部停止。西部构造域与中部构造域接触部位因俯冲挤压应力消失,产生应力松弛,沿着两构造域接触部位发生伸展垮塌,形成地堑式乔治六世海峡,西部构造域与中部构造域分离。

5.5 布兰斯菲尔德海峡的打开(~4 Ma,图 5f)

在布兰斯菲尔德海峡打开之前,南极半岛北部的南设得兰群岛在50~40 Ma 期间发生拆沉事件。拆沉作用之前,俯冲作用的驱动力和地幔楔浮力相平衡,岩浆作用与板块俯冲有关。随后,菲尼克斯板块的俯冲加厚了南设得兰群岛下部的岩石圈地幔,且逐渐增强的应力足以使厚层岩石发生拆沉,导致软流圈上涌,并阻挡了俯冲作用的继续,从而使得菲尼克斯板块回卷(roll back),会聚速率突然降低。上涌软流圈地幔所带的热量触发了安山质-英安质熔岩的形成(Wang *et al.*, 2009)。

拆沉作用在40~30 Ma 结束,软流圈地幔上涌减弱,导致菲尼克斯板块继续向海沟处俯冲,使得南极-菲尼克斯扩张脊逐步靠近海沟。在菲尼克斯洋脊扩张停止之后,由于俯冲伴随的回撤和南设得兰

群岛海沟后退引发了区域性的拉张。在 4 Ma 左右,随着板块俯冲和洋脊扩张作用的全部停止,已俯冲在南极半岛之下的板块继续下沉,由于缺失扩张脊的推动力,使得下沉板块产生回卷,最终导致布兰斯菲尔德海峡弧后盆地的打开,形成最深达 2000 m 的不对称地堑式构造边缘盆地 (Barker, 1982; Larter and Barker, 1991; Willan and Kelley, 1999; Larter *et al.*, 2002)。

6 与南美巴塔哥尼亚对比

6.1 巴塔哥尼亚地质演化简况

巴塔哥尼亚安第斯位于现今南美最南端的活动大陆边缘。巴塔哥尼亚岩基是一套独立的钙碱性深成杂岩,主要出露在南安第斯的智利和阿根廷,是新生代环太平洋最大的岩基之一。深成岩体以准铝质岩石为主,过铝质岩石所占比例很小。巴塔哥尼亚南部的 Deseado 地块记录了早寒武世到晚古生代的冈瓦纳裂解作用 (Pankhurst *et al.*, 2003, 2006)。两个主要构造事件影响了巴塔哥尼亚,分别为南大西洋的打开事件和安第斯俯冲事件 (Zaffarana *et al.*, 2014)。沿着巴塔哥尼亚西缘向东的俯冲作用始于晚古生代,随时间发生迁移和方向的变化,在晚侏罗世到达了现今位置 (Mpodozis and Ramos, 2008; Breitsprecher and Thorkelson, 2009; Sommoza and Ghidella, 2012)。白垩纪冈瓦纳的裂解作用导致南大西洋打开,并在巴塔哥尼亚南部产生伸展作用和大量流纹岩质火山作用 (Pankhurst *et al.*, 1998, 2000)。随后,巴塔哥尼亚东部边缘以沉降和沉积为主,形成了南国盆地 (Austral/Magallanes Basin)。巴塔哥尼亚安第斯新生代的构造演化以南极板块-纳兹卡 (Nazca) 板块扩张中心与秘鲁-智利海沟碰撞形成的智利边缘三联点为特征。在大约 14~15 Ma,智利山脉在纳兹卡和南极板块之间适度扩张,南极板块-纳兹卡板块扩张中心与秘鲁-智利海沟碰撞形成了智利边缘三联点。而后,随着进一步的俯冲碰撞,该三联点向北迁移 (Cande and Leslie, 1986; Zaffarana *et al.*, 2014)。

6.2 地质时代对比

Fanning 等 (2011) 对智利巴塔哥尼亚的 Duque de York 杂岩、南设得兰群岛的迈尔斯陡崖组 (Miers Bluff Formation) 和南极半岛的特里尼蒂半岛群浊积砂岩中的碎屑锆石进行了 U-Pb 定年,所测的年龄数据峰期都在 290 Ma 左右,表明它们都来源于一个类似的物源区。对南极半岛和巴塔哥尼亚熔结凝灰岩的锆石 U-Pb 年代学研究表明,南极半岛熔

结凝灰岩的形成年龄主要集中在 184~162 Ma,而巴塔哥尼亚熔结凝灰岩的年龄范围为 188~153 Ma (Pankhurst *et al.*, 2000)。这些年龄表明,南极半岛和南美南部火山活动跨越了整个侏罗纪,且可分成 3 期:第 1 期为 188~178 Ma,发生在巴塔哥尼亚东部和南极半岛南部与板内有关的火山作用 (Pankhurst *et al.*, 2000),该期的硅质火山岩省发育在冈瓦纳裂解早期阶段 (Riley *et al.*, 2001);第 2 期为 172~162 Ma,火山作用发生在巴塔哥尼亚南部和南极半岛北部 (Pankhurst *et al.*, 2000),且中侏罗世南极半岛梅普尔组硅质火山岩和南美 Chon Aike Formation 的硅质火山岩都可能是由于“格林威尔期”含有铁镁质下地壳的深熔作用所形成 (Riley *et al.*, 2001);第 3 期为 157~153 Ma,该期火山作用事件发育在整个巴塔哥尼亚地区和南极半岛基岩部位。总之,火山作用事件在巴塔哥尼亚由东向西迁移,而在南极半岛上由南向北迁移 (Pankhurst *et al.*, 2000; Riley *et al.*, 2001) (表 1)。

表 1 南极半岛与南美巴塔哥尼亚的地质联系
Table 1 The geological relationships between the Antarctic Peninsula and Patagonia

南极半岛		南美巴塔哥尼亚	地质联系
火山作用时代	熔结凝灰岩锆石 U-Pb 年龄主要集中在 184~162 Ma	熔结凝灰岩 U-Pb 年龄主要集中在 188~153 Ma	火山作用时代大致相同,且在南极半岛由南向北迁移,而在巴塔哥尼亚由东向西迁移
	南设得兰群岛的迈尔斯陡崖组合南极半岛的特里尼蒂半岛群浊积砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄峰值在 290 Ma 左右,其 ε_{Hf} 值在 -5.2~+2.6	智利巴塔哥尼亚的 Duque de York 杂岩锆石 U-Pb 年龄峰值在 290 Ma 左右,其 ε_{Hf} 值在 -14~+3.2	两地具有大致相同的碎屑锆石年龄,且 Lu-Hf 同位素 ε_{Hf} 值集中在 -6~+1 之间,具有相似的初始物源
地球化学特征	侏罗-白垩纪早期以流纹岩为主的硅质火山岩省具有钙碱性特征,形成于岛弧环境中	侏罗-白垩纪早期以流纹岩为主的硅质火山岩省具有钙碱性分异及贫铁特征,东部高 Zr 和 Nb,西部为与岛弧有关的亚碱性岩	两地区发育一个统一的侏罗-白垩纪早期硅质火山岩省
构造行迹特征	亚历山大岛中侏罗-早白垩世的俯冲杂岩、南极半岛北部早白垩世断层和象岛白垩纪俯冲杂岩中都保存有左行挤压构造行迹	智利南部 Liquine-Ofqui 断层带中的早白垩世及更老的花岗岩中保存有左行剪切挤压构造行迹	两地区至少在白垩纪处于同一挤压变形构造体制中

6.3 地球化学对比

Fanning 等(2011)对巴塔哥尼亚西部和南极半岛地区增生楔中的二叠纪碎屑变质沉积物也进行了 Lu-Hf 同位素物源分析,结果表明 ϵ_{Hf} 值大部分都在 $-15 \sim +4$, 且超过 85% 的样品的 ϵ_{Hf} 值在 $-6 \sim +1$, 指示这些变质沉积岩的物源来源于二叠纪岩浆岩, 且负 ϵ_{Hf} 值反应出其更可能来自于成熟的地壳物源。由于南极半岛和巴塔哥尼亚南部的地理位置从二叠纪到侏罗纪非常接近, 从而进一步证实两地区二叠纪变质沉积物来自于统一的碎屑物源。巴塔哥尼亚和南极半岛发育一个统一的侏罗纪—白垩纪早期(大约 188~140 Ma)以流纹岩为主的硅质大火山岩省, 其地球化学具有钙碱性分异及贫铁的特征, 且东部高 Zr 和 Nb, 西部则显示与岛弧有关的亚碱性, 其岩石成因模型是玄武质岩浆底侵导致的成熟下地壳的部分熔融(Pankhurst *et al.*, 1998)(表 1)。

6.4 构造联系

在晚侏罗世—白垩纪超级大陆裂解之前, 沿冈瓦纳太平洋边缘, 尤其是现今的巴塔哥尼亚、西南极和新西兰一带发育有大量的增生杂岩, 说明三者具有紧密的成因联系(Dalziel, 1981, 1982; Dalziel and Brown, 1989)。南极半岛和巴塔哥尼亚造山带都位于南美板块、斯科舍板块和南极板块三者的接触部位。亚历山大岛俯冲杂岩中保存有中侏罗世—早白垩世的左行剪切挤压构造形迹(Doubleday and Storey, 1998), 南极半岛北部早白垩世断层也表现为北西—南东的古应力轴及左行剪切挤压变形(Vaughan and Storey, 2000; Whitham and Storey, 1989), 像岛白垩纪俯冲杂岩中同样保存了左行剪切挤压构造形迹的证据(Trouw *et al.*, 2000)。与此相对应, 智利南部 Liquine-Ofqui 断层带中的早白垩世及更老的花岗岩同样保留了左行剪切挤压构造形迹(Cembrano *et al.*, 2000; Vaughan *et al.*, 2012a)。这说明, 这两个地区至少在白垩纪处于同一挤压变形构造体制之下(表 1)。

总之, 尽管巴塔哥尼亚和南极半岛目前被德雷克海峡和斯科舍海所分割, 但两地区侏罗纪火山作用时间大致相同(Pankhurst *et al.*, 2000)。前侏罗世的浊积岩又来自于同一个类似的物源区(Pankhurst *et al.*, 2000; Fanning *et al.*, 2011), 表明巴塔哥尼亚和南极半岛在白垩纪及以前可能是连续的。晚白垩世以来, 南极半岛和南美安第斯南部开始向西南运移, 且南安第斯向西迁移速率比南极半岛快。大约

从 45 Ma 开始, 南极半岛向南运移, 而南美南部向北运移, 两者发生相对离散运动, 即形成了现有的斯科舍海。现今, 南美板块和南极板块间的离散方向变为东西向(Cunningham, 1993; Eagles and Jokat, 2014), 从而形成了现在的南极半岛和巴塔哥尼亚的地理对应关系(图 6)。

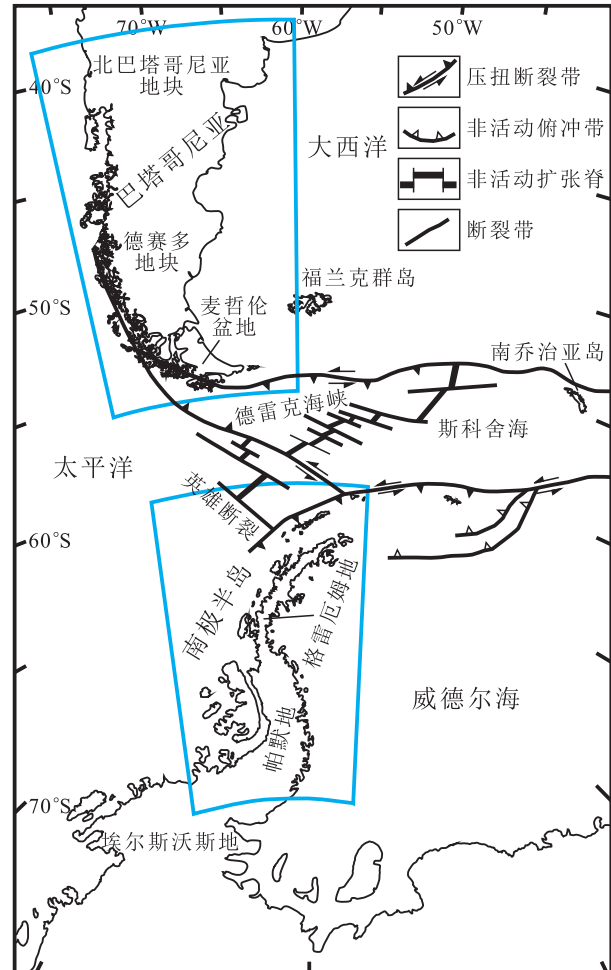


图 6 南极半岛与南美巴塔哥尼亚的构造连接图

(据 Pankhurst *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2009 修编)

Fig.6 Sketch map of tectonic relationship between the Antarctic Peninsula and Patagonia of South America (modified after Pankhurst *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2009)

7 结论

(1) 南极半岛可以分成准原地的东部冈瓦纳构造域、外来的中部岩浆弧构造域和西部增生杂岩构造域, 3 个构造域在白垩纪中期通过碰撞汇聚在一起。

(2) 中生代岛弧岩浆作用在南极半岛有随时间从东南向西北逐渐迁移的规律, 在南设得兰群岛则随时间从西南向东北逐渐迁移, 这与大洋板块的

俯冲和后撤有关。

(3) 南极半岛和南美巴塔哥尼亚在二叠纪具有共同的沉积物源, 且两地区侏罗纪—白垩纪火山作用的时代和地球化学性质大致相同, 推测二者至少在白垩纪以前是相连的。

参考文献 (References):

- Barker P F. 1982. The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. *Journal of the Geological Society*, 139(6): 78–801
- Bell A C, King E C. 1998. New seismic data support Cenozoic rifting in George VI Sound, Antarctic Peninsula. *Geophysical Journal International*, 134(3): 889–902
- Bradshaw J D, Vaughan A P M, Millar I L, Flowerdew M J, Trouw R A J, Fanning C M, Whitehouse M J. 2012. Permo-Carboniferous conglomerates in the Trinity Peninsula Group at View Point, Antarctic Peninsula: sedimentology, geochronology and isotope evidence for provenance and tectonic setting in Gondwana. *Geological Magazine*, 149(4): 626–644
- Breitsprecher K, Thorkelson D J. 2009. Neogene kinematic history of Nazca-Antarctic-Phoenix slab windows beneath Patagonia and the Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, 464(1): 10–20
- Cabanis B, Lecolle M. 1989. Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus Academie Sciences, Séries II* 309: 2023–2029
- Cande S C, Leslie R B. 1986. Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Journal of Geophysical Research*, 91: 471–496
- Cembrano J, Schermer E, Lavenue A, Sanhueza A. 2000. Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquine Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, 319(2): 129–149
- Cunningham W D. 1993. Strike-slip faults in the southernmost Andes and the development of the Patagonian Orocline. *Tectonics*, 12(1): 169–186
- Dalziel I W D. 1981. Back-arc extension in the southern Andes, a review and critical reappraisal. *Royal Society of London Philosophical Transaction*, A 300: 319–335
- Dalziel I W D. 1982. Pre-Jurassic history of the Scotia Arc region, in Craddock, C., ed, *Antarctic geoscience*. Madison, University of Wisconsin Press, 111–126
- Dalziel I W D, Brown R L. 1989. Tectonic denudation of the Darwin metamorphic core complex in the Andes of Tierra del Fuego, southernmost Chile: Implications for Cordilleran orogenesis. *Geology*, 17: 699–703
- Dalziel I W D, Elliot D H. 1982. West Antarctica: Problem child of Gondwanaland. *Tectonics*, 1(1): 3–19
- Davies T G. 1984. The geology of part of Northern Palmer Land. *Scientific Report of the British Antarctic Survey*, 103
- Doubleday P A, Storey B C. 1998. Deformation history of a Mesozoic forearc basin sequence on Alexander Island, Antarctic Peninsula. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(1): 1–21
- Eagles G, Jokat W. 2014. Tectonic reconstructions for paleobathymetry in Drake Passage. *Tectonophysics*, 611: 28–50
- Fanning C M, Hervé F, Pankhurst R J, Rapela C W, Kleiman L E, Yaxley G M, Castillo P. 2011. Lu-Hf isotope evidence for the provenance of Permian detritus in accretionary complexes of western Patagonia and the northern Antarctic Peninsula region. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4): 485–496
- Farquharson G W. 1982. Late Mesozoic sedimentation in the northern Antarctic Peninsula and its relationship to the southern Andes. *Journal of the Geological Society*, 139(6): 721–727
- Farquharson G W. 1984. Late Mesozoic, non-marine conglomeratic sequences of northern Antarctic Peninsula (The Botany Bay Group). *British Antarctic Survey Bulletin*, 65: 1–32
- Flowerdew M J, Millar I L, Vaughan A P M, Horstwood M S A, Fanning C M. 2006. The source of granitic gneisses and migmatites in the Antarctic Peninsula: a combined U-Pb SHRIMP and laser ablation Hf isotope study of complex zircons. *Contributions Mineralogy and Petrology*, 151(6): 751–768
- Flowerdew M J, Millar I L, Vaughan A P M, Pankhurst R J. 2005. Age and tectonic significance of the Lassiter Coast Intrusive Suite, Eastern Ellsworth Land, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*, 17(3): 443–452
- Haase K M, Beier C, Fretzdorff S, Smellie J L, Garbe-Schönberg D. 2012. Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(6): 1103–1119
- Hervé F, Faúndez V, Brix M, Fanning M. 2006. Jurassic sedimentation of the Miers Bluff Formation, Livingston Island, Antarctica: evidence from SHRIMP U-Pb ages of detrital and plutonic zircons. *Antarctic Science*, 18(2): 229–238
- Hole M J, Kempton P D, Millar I L. 1993. Trace element and isotope characteristics of small degree melts of the asthenosphere: evidence from the alkalic basalts of the Antarctic Peninsula. *Chemical Geology*, 109: 51–68
- Hole M J, Rogers G, Saunders A D, Storey M. 1991. Relation between alkalic volcanism and slab-window formation. *Geology*, 19(6): 657–660
- Hunter M A, Cantrill D J. 2006. A new stratigraphy for the Latady Basin, Antarctic Peninsula: Part 2, Latady Group and basin evolution. *Geological Magazine*, 143(6): 797–819
- Hunter M A, Cantrill D J, Flowerdew M J, Millar I L. 2005. Mid-Jurassic age for the Botany Bay Group: implications for Weddell Sea Basin creation and southern hemisphere biostratigraphy. *Journal of the Geological Society*, 162(5): 745–748
- Hunter M A, Riley T R, Cantrill D J, Flowerdew M J, Millar I L. 2006. A new stratigraphy for the Latady Basin, Antarctic Peninsula: Part 1, Ellsworth Land Volcanic Group. *Geological Magazine*, 143(6): 777–796
- Keller R A, Fisk M R, White W M, Birkenmajer K. 1992. Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin volcanism, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 111: 287–303
- Kellogg K S, Rowley P D. 1989. Structural geology and tectonics of the Orville Coast region, southern Antarctic Peninsula, Antarctica. U.

- S. Geological Survey Professional Paper, 149
- Kosler J, Magna T, Mlčoch B, Mixa P, Nývlt D, Holub F V. 2009. Combined Sr, Nd, Pb and Li isotope geochemistry of alkaline lavas from northern James Ross Island (Antarctic Peninsula) and implications for back-arc magma formation. *Chemical Geology*, 258 (3): 207–218
- Kristjánsson L, Gudmundsson M T, Smellie J L, McIntosh W C, Esser R. 2005. Palaeomagnetic, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and stratigraphical correlation of Miocene-Pliocene basalts in the Brandy Bay area, James Ross Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 17(3): 409–417
- Larter R D, Barker P F. 1991. Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading forces on a young subducting plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96 (B12): 19583–19607
- Larter R D, Cunningham A P, Barker P F, Gohl K, Nitsche F P. 2002. Tectonic evolution of the Pacific margin of Antarctica 1. Late Cretaceous tectonic reconstructions. *Journal of Geophysical Research*, 107 (B12): EPM-5
- Leat P T, Flowerdew M J, Whitehouse M J, Scarrow J H, Millar I L. 2009. Zircon U-Pb dating of Mesozoic volcanic and tectonic events in north-west Palmer Land and south-west Graham Land, Antarctica. *Antarctic Science*, 21(6): 633–641
- Leat P T, Scarrow J H, Millar I L. 1995. On the Antarctic Peninsula batholith. *Geological Magazine*, 132(4): 399–412
- Loske W, Miller H. 1991. U-Pb and Rb-Sr geochronology on conglomerate boulders from View point. Graham Land, Antarctic Peninsula. Abstracts Sixth International Symposium on Antarctic Earth Science, Tokyo, National Institute of Polar Research, 369–373
- Macdonald D I M, Butterworth P J. 1990. The stratigraphy, setting and hydrocarbon potential of the Mesozoic sedimentary basins of the Antarctic Peninsula. Antarctica as an Exploration Frontier. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 7: 240–244
- McCarron J J, Larter R D. 1998. Late Cretaceous to early Tertiary subduction history of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 155(2): 255–268
- McCarron J J, Millar I L. 1997. The age and stratigraphy of fore-arc magmatism on Alexander Island, Antarctica. *Geological Magazine*, 134 (4): 507–522
- McClulloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3): 358–374
- Meneilly A W. 1988. Reverse fault step at Engel Peaks, Antarctic Peninsula. *Journal of structural geology*, 10(4): 393–403
- Millar I L, Pankhurst R J, Fanning C M. 2002. Basement chronology of the Antarctic Peninsula: recurrent magmatism and anatexis in the Palaeozoic Gondwana Margin. *Journal of the Geological Society*, 159 (2): 1457–157
- Mpodzis C, Ramos V A. 2008. Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones? *Revista de la Asociación geológica Argentina*, 63(4): 481–497
- Nelson P H H. 1975. The James Ross Island Volcanic Group of north-east Graham Land. *British Antarctic Survey Scientific Report*, 54: 1–62
- Pankhurst R J. 1982. Rb-Sr geochronology of Graham Land, Antarctica. *Journal of the Geological Society*, 139: 701–711
- Pankhurst R J, Leat P T, Sruoga P, Rapela C W, Márquez M, Storey B C, Riley T R. 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81(1): 113–136
- Pankhurst R J, Rapela C W, Fanning C M, Marquez M. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth-Science Reviews*, 76(3): 235–257
- Pankhurst R J, Rapela C W, Loske W P, Márquez M, Fanning C M. 2003. Chronological study of the pre-Permian basement rocks of southern Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 16 (1): 27–44
- Pankhurst R J, Riley T R, Fanning C M, Kelley S P. 2000. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of Magmatism Associated with the Break-up of Gondwana. *Journal of petrology*, 41(5): 605–625
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination for the tectonic interpretation of granitic rock. *Journal of petrology*, 25(4): 956–983
- Riley T R, Flowerdew M J, Whitehouse, M J. 2012a. U-Pb ion-microprobe zircon geochronology from the basement inliers of eastern Graham Land, Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 169: 381–393
- Riley T R, Flowerdew M J, Whitehouse M J. 2012b. Chrono- and lithostratigraphy of a Mesozoic-Tertiary fore- to intra-arc basin: Adelaide Island, Antarctic Peninsula. *Geological Magazine*, 149 (5): 768–782
- Riley T R, Leat P T. 1999. Large volume silicic volcanism along the proto-Pacific margin of Gondwana: lithological and stratigraphical investigations from the Antarctic Peninsula. *Geological Magazine*, 136 (1): 1–16
- Riley T R, Leat P T, Pankhurst R J, Harris C. 2001. Origins of Large Volume Rhyolitic Volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by Crustal Melting. *Journal of petrology*, 42 (6): 1043–1065
- Scarrow J H, Pankhurst R J, Leat P T, Vaughan A P M. 1996. Genesis and evolution of Antarctic Peninsula granitoids: a case study from Mount Charity, NE Palmer Land. *Antarctic Science*, 8: 193–206
- Skilling I P. 2002. Basaltic pahoehoe lava-fed deltas: large-scale characteristics, clast generation, emplacement processes and environmental discrimination. Geological Society, London, Special Publications, 202: 91–113
- Smellie J L. 1999. Lithostratigraphy of Miocene-Recent, alkaline volcanic fields in the Antarctic Peninsula and eastern Ellsworth Land. *Antarctic Science*, 11(3): 362–378
- Smellie J L, McIntosh W C, Esser R, Fretwell P. 2006. The Cape Purvis volcano, Dundee Island (northern Antarctic Peninsula): late Pleistocene age, eruptive processes and implications for a glacial palaeo-environment. *Antarctic Science*, 18(3): 399–408
- Smellie J L, Millar I L. 1995. New K-Ar isotope ages of schists from Nordenskjöld Coast, Antarctic Peninsula: oldest part of the Trinity Peninsula Group? *Antarctic Science*, 7(2): 191–196
- Smellie J L, Pankhurst R J, Thomson M R A, Davies R E S. 1984. The

- geology of the South Shetland Islands. VI: stratigraphy, geochemistry and evolution. Scientific reports-British Antarctic Survey, 87: 1-83
- Somoza R, Ghidella M E. 2012. Late Cretaceous to recent plate motions in western South America revisited. *Earth and Planetary Science Letters*, 331-332: 152-163
- Storey B C, Dalziel I W D, Garrett S W, Grunow A M, Pankhurst R J, Vennum W R. 1988. West Antarctica in Gondwanaland: Crustal blocks reconstruction and breakup processes. *Tectonophysics*, 155 (1): 381-390
- Storey B C, Garrett S W. 1985. Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension. *Geological Magazine*, 122 (1): 5-14
- Tangeman J, Mukasa S B. 1996. Zircon U-Pb geochronology of plutonic rocks from the Antarctic Peninsula: Confirmation of the presence of unexposed Paleozoic crust. *Tectonics*, 15(6): 1309-1324
- Thomson M R A, Pankhurst R J. 1983. Age of post-Gondwanian calc-alkaline volcanism in the Antarctic Peninsula region. *Antarctic Earth Science*, 289-294
- Trouw R A J, Passchier C W, Valeriano C M, Simoes L S A, Paciullo F V P, Ribeiro A. 2000. Deformational evolution of a Cretaceous subduction complex: Elephant Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Tectonophysics*, 319(2): 93-110
- Trouw R A J, Simoes L S A, Valladres C S. 1998. Metamorphic evolution of a subduction complex, South Shetland Islands, Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 475-490
- Vaughan A P M, Eagles G, Flowerdew M J. 2012a. Evidence for a two-phase Palmer Land event from crosscutting structural relationships and emplacement timing of the Lassiter Coast Intrusive Suite, Antarctic Peninsula: Implications for mid-Cretaceous Southern Ocean plate configuration. *Tectonics*, 31(1): 1-19
- Vaughan A P M, Leat P T, Dean A A, Millar I L. 2012b. Crustal thickening along the West Antarctic Gondwana margin during mid-Cretaceous deformation of the Triassic intra-oceanic Dyer Arc. *Lithos*, 142-143: 130-147
- Vaughan A P M, Pankhurst R J, Fanning C M. 2002. A mid-Cretaceous age for the Palmer Land event, Antarctic Peninsula: implications for terrane accretion timing and Gondwana palaeolatitudes. *Journal of the Geological Society*, 159(2): 113-116
- Vaughan A P M, Storey B C. 2000. The eastern Palmer Land shear zone: a new terrane accretion model for the Mesozoic development of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 157(6): 1243-1256
- Vaughan A P M, Wareham C D, Johnson A C, Kelley S P. 1998. A low-*c*retaceous, syn-extensional magmatic source for a linear belt of positive magnetic anomalies: The Pacific Margin Anomaly (PMA), western Palmer Land, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 158(3): 143-155
- Vaughan A P M, Wareham C D, Millar I L. 1997. Granitoid pluton formation by spreading of continental crust: the Wiley Glacier complex, northwest Palmer Land, Antarctica. *Tectonophysics*, 283 (1): 35-60
- Veevers J J, Saeed A. 2013. Age and composition of Antarctic sub-glacial bedrock reflected by detrital zircons, erratics, and recycled microfossils in the Ellsworth Land-Antarctic Peninsula-Weddell Sea-Dronning Maud Land sector (240°E-0°~015°E). *Gondwana Research*, 23(1): 296-332
- Vennum W R, Rowley P D. 1986. Reconnaissance geochemistry of the Lassiter Coast intrusive suite, southern Antarctic Peninsula. *Geological Society of American Bulletin*, 97(12): 1521-1533
- Wang F, Zheng X S, Lee J I K, Choe W H, Evans N. 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. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(12): 1-29
- Wareham C D, Millar I L, Vaughan A P M. 1997. The generation of sodic granite magmas, western Palmer Land, Antarctic Peninsula. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(1): 81-96
- Wendt A S, Vaughan A P M, Tate A. 2008. Metamorphic rocks in the Antarctic Peninsula region. *Geological Magazine*, 145 (5): 655-676
- Wever H E, Millar I L, Pankhurst R J. 1994. Geochronology and radiogenic isotope geology of Mesozoic rocks from eastern Palmer Land, Antarctic Peninsula: crustal anatexis in arc-related granitoid genesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 7(1): 69-84
- Whitham A G, Storey B C. 1989. Late Jurassic-Early Cretaceous strike-slip deformation in the Nordenskjöld Formation of Graham Land. *Antarctic Science*, 1: 269-278
- Willan R C R, Kelley S P. 1999. Mafic dike swarms in the South Shetland Islands volcanic arc: unravelling multiphasic magmatism related to subduction and continental rifting. *Journal of geophysical research*, 104(B10): 23051-23068
- Yegorova T, Bakhmutov V, Janik T, Grad M. 2011. Joint geophysical and petrological models for the lithosphere structure of the Antarctic Peninsula continental margin. *Geophysical Journal International*, 184(1): 90-110
- Zaffarana C, Tommasi A, Vauchez A, Gregoire M. 2014. Microstructures and seismic properties of shouth Patagonian mantle xenoliths (Gobernador Gregores and Pali Ake). *Tectonophysics*, 621: 175-197
- 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. 北京: 商务印书馆
- 金庆民, 孙南圭, 匡福祥, 王关华. 1988. 南极菲尔德斯半岛岛弧火山岩中的辉石. 中国地质科学院南京地质矿产研究所文集, 9 (4): 31-46
- 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. 北京: 科学出版社
- 邢光福. 2003. 南极南设得兰群岛中-新生代岛弧火山-侵入杂岩. 北京: 地质出版社
- 邢光福, 沈渭洲, 王德滋, 陶奎元, 金庆民. 1997. 南极乔治王岛中-新生代岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成及源区特征. 岩石学报, 13 (4): 473-487
- 郑祥身, 刘小汉, 杨瑞英. 1988. 西南极长城站地区第三系火山岩岩石学特征. 岩石学报, 4(1): 34-47

(本文责任编辑: 龚超颖)