DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.068

文章编号: 1006-6616 (2021) 05-0835-20

西南极中—新生代古地磁与板块重建研究进展

高 亮

GAO Liang

中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083

School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

GAO L, 2021. Progress in Mesozoic-Cenozoic paleomagnetism and plate reconstruction of West Antarctica [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5); 835–854. DOI: 10.12090/j. issn. 1006–6616. 2021. 27. 05. 068

Abstract: In this study, we summarized paleomagnetic data from West Antarctica and reconstructed the paleoposition of different crustal blocks of West Antarctica. Plate reconstructions identified two widely influenced tectonic events in West Antarctica due to the subduction of the Pacific Plate, including the rapid southward drift of Thurston Island-Eights Coast and Eastern Marie Byrd Land during the eruption of Ontong Java-Manihiki-Hikurangi Large Igneous Provinces and related peak global ocean crust production rate at 120 ~ 100 Ma; The lithospheric extension in the Ross Sea region and rapid separation of Thurston Island-Eights Coast and Marie Byrd Land from East Antarctica, as well as the southward drift and clockwise rotation of the Antarctic Peninsula due to the subduction of Pacific-Phoenix Ridge under the Ross sea region at ~ 100 Ma. This supports a co-evolution of the tectonic process between the Pacific Plate subduction and the plate motion in West Antarctica. In the future, we need more reliable paleomagnetic data with precise age constraints to make a more detailed reconstruction of different tectonic processes of West Antarctica. This will help us in understanding the geological evolution of Antarctica, and the geodynamics mechanism of plate growth and plate separation.

Key words: West Antarctica; paleo-pacific plate; paleomagnetism; plate reconstruction; Mesozoic-Cenozoic

摘 要:根据西南极已发表的中—新生代古地磁数据,对西南极不同地块进行了古大陆重建。识别出古 太平洋板块对西南极构造演化影响广泛的两次构造事件:一是120~100 Ma 古太平洋板块内翁通爪哇-马 尼希基-希库朗基大火成岩省的喷发与全球板块洋壳扩张速率高峰期引起的西南极瑟斯顿岛-埃茨海岸与 东玛丽·伯德地快速南向移动;二是古太平洋-凤凰板块洋中脊在~100 Ma 俯冲至西南极之下导致的以罗 斯海区域为主的岩石圈伸展、瑟斯顿岛-埃茨海岸与玛丽·伯德地远离东南极以及南极半岛发生南向运动 与顺时针旋转。证明太平洋板块俯冲与西南极板块运动的耦合关系。未来需要在西南极获得更多具有准 确年代学限制的可靠的古地磁数据,这将对西南极的构造演化模式提供更多的制约,并有助于深入理解 南极大陆的构造演化过程、板块生长与裂解的地球动力学机制。

关键词:西南极;古太平洋板块;古地磁;古大陆重建;中-新生代

中图分类号: P541; P318.4+4 文献标识码: A

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-09-08; 责任编辑: 吴芳

基金项目:国家重点研发计划 (2018YFC1406904);国家自然科学基金项目 (41930218,41706222,42076223)

This research is financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFC1406904) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41930218, 41706222, 42076223)

第一作者简介:高亮(1987—),男,副教授,博士生导师,主要从事南极地质学相关研究。E-mail: lgao@ cugb. edu. cn

引用格式:高亮,2021.西南极中—新生代古地磁与板块重建研究进展 [J].地质力学学报,27 (5):835-854.DOI:10.12090/ j.issn.1006-6616.2021.27.05.068

0 引言

橫贯南极山脉 (Transantarctic Mountains) 将南 极大陆分为东南极 (East Antarctica) 与西南极 (West Antarctica)。其中东南极位于横贯南极山脉以 东,是在前寒武纪变质基底之上发育而成,其上覆 盖有古生代沉积岩,并被以侏罗纪杜费克杂岩体 (Dufex Complex)、弗拉尔粒玄岩岩床 (Ferrar Dolerite) 及柯克帕特里克 (Kirkpatrick) 玄武岩为 代表的的基性岩浆侵入或覆盖 (Fitzsimons, 2000; 陈廷愚等, 2008), 普遍发育格林维尔与泛非两期高 级变质事件 (Zhao et al., 1992, 1995; 赵越, 1993; Liu et al., 2003, 2006; 陈廷愚等, 2008; 刘晓春, 2018)。西南极位于横贯南极山脉以西,其东侧为威 德尔海,西侧受到太平洋板块自古生代以来俯冲作 用的持续影响,主要包括以下5个地质单元:斯科 舍弧 (Scotia Arc)、南极半岛 (Antarctic Peninsula)、 瑟斯顿岛-埃茨海岸 (Thurston Island-Eights Coast)、 玛丽・伯德地 (Marie Byrd Land) 与埃尔斯沃思山 脉 (Ellsworth Mountains) (Dalziel, 1982)。这些地 质单元经历了不同的构造演化,具有不同的地质记 录,由大规模断层或洋壳分隔。新西兰曾为西南极 的一部分,与玛丽·伯德地相连,晚白垩世之后逐 渐向北运动到目前的位置 (Cande et al., 1995; Mukasa and Dalziel, 2000)。与东南极相对稳定的克 拉通相比, 西南极地块中生代以来经历了板块运动 及与之相关的构造-岩浆-成矿作用,这与冈瓦纳大 陆的形成与裂解息息相关。因此,对不同地块开展 古大陆重建对理解冈瓦纳大陆边缘板块汇聚、裂解 过程、成矿成藏效应及其地球动力学背景具有重要 意义。古地磁学能半定量约束板块运动过程,从不 同空间与时间尺度重建岩石圈构造演化,在板块构 造研究中发挥着重要作用,相关学者们在西南极开展 了一定程度的古地磁与古大陆重建工作, 文章总结了 这些在西南极发表的中-新生代古地磁数据,结合东 南极同期视极移曲线,对东南极与西南极不同地块开 展了古大陆重建,探讨了其代表的大地构造意义。

南极半岛与南设得兰群岛中—新生 代古地磁学研究

南极半岛位于西南极最北端,靠近南美板块,

其形成过程及构造属性仍存在一定争议(图1)。 Suárez (1976) 提出南极半岛是发育在冈瓦纳大陆 边缘,在古太平洋板块俯冲下形成的以中-新生 代的岩浆弧为主的地体,发育了完整的沟-弧-盆 体系。之后, Vaughan and Storey (2000) 和 Vaughan et al. (2002) 在南极半岛南部识别出大 规模脆性--脆韧性东帕默地剪切带 (Eastern Palmer Land Shear Zone),并通过对同变形期花岗岩 脉40Ar-39Ar 同位素定年,将剪切事件发生时间限定 在 106.9±1.1 与 102.8±3.3 Ma, 并将这次构造事 件被命名为"帕默地事件"。在此基础上 Vaughan and Storey (2000) 根据剪切带两侧地质特征的不 同,将南极半岛划分为3个构造域,包括西部构造 域 (Western domain)、中部构造域 (Central domain) 与东部构造域 (Eastern domain), 提出了 两个南极半岛拼合模型:一是中西部构造域作为 外来地体在中一晚侏罗世时向东俯冲至东部构造 域之下:二是东部构造域中—晚侏罗世时向西俯 冲至中-西部构造域之下。两种模式中的中部与东 部构造域都是在晚侏罗世发生了"软碰撞"和之 后的走滑挤压以及抬升剥蚀,中白垩世时发生了 "硬碰撞" (帕默地事件) (Vaughan and Storey, 2000; Vaughan et al., 2002)。其中, 西部构造域 包括南极半岛南部的亚历山大岛 (Alexander Island)、阿德莱德岛(Adelaide Island)与南极半 岛北部的南设得兰群岛 (South Shetland Islands), 主要地层为亚历山大岛浊积岩、外来洋底玄武岩 与沉积岩组成的侏罗纪—白垩纪勒梅群 (LeMay Group) 和南设得兰群岛斯科舍杂岩群 (Scotia Metamorphic Complex) (Holdsworth and Nell, 1992; Vaughan et al., 2002)。在亚历山大岛出露了大面 积的三叠系和上石炭统—二叠系含生物化石砂岩 (Willan, 2003), 亚历山大岛弧前盆地的增生杂岩 楔形成时间为中侏罗世—中白垩世。Vaughan and Storey (2000) 通过将西部构造域与新西兰东部、 智利中南部以西和北巴塔哥尼亚增生变质杂岩进 行对比,提出西部构造域可能是古太平洋板块向 中部构造域俯冲过程中发育在中部构造域西侧的 弧前增生楔或者外来地体。

中部构造域位于东帕默地剪切带以西,正片 麻岩变质基底主要出露在帕默地西北部,被侏罗 纪—新生代辉长岩、花岗岩等侵入(Vaughan and Storey, 2000; Zheng et al., 2018)。对乔治六世海



a--南极不同地质单元地理位置; b--南极半岛地质简图

图 1 南极半岛地质简图 (据Hathway et al., 1999; Vaughan and Storey, 2000; Burton-Johnson and Riley, 2015 修改) Fig. 1 Simplified geological map of the Antarctic Peninsula (modified after Hathway et al., 1999; Vaughan and Storey, 2000; Burton-Johnson and Riley, 2015)

(a) Location of different geological domains of Antarctica; (b) Simplified geological map of the Antarctic Peninsula

峡(George VI Sound) 开展的多倍地震反射与宽角 反射/折射地震图像显示, 南极半岛南部中、西部 构造域被伸展背景下的正断层所分隔 (Bell and King, 1998)。根据航空物探资料以及不同的岩石 组合, Ferraccioli et al. (2006)将中部构造域进一 步分为西部(长英质)与东部(镁铁质)地区, 提出东西部拼贴导致东帕默地剪切带的形成。 Vaughan and Storey (2000)将中部构造域与新西 兰中部构造带、玛丽·伯德地、智利北部的科迪 勒拉山系进行对比, 认为其为外来地体拼贴到东 部构造域。

东帕默地剪切带将中部构造域与东部构造域 分开,东部构造域作为古生代时冈瓦纳大陆的延 伸,主要由中生代沉积盆地与冈瓦纳大陆裂解时 产出的中侏罗世钙碱性硅质大火成岩省 (Chon Aike silicic large igneous province)、格雷厄姆地 (Graham Land)晚石炭世—晚三叠世特里尼蒂半 岛群 (Trinity Peninsula Group) 浊积岩、侏罗系普 思特山组 (Mount Poster Formation) 钙碱性火山 岩、拉塔迪组(Latady Formation)海相到陆相的 砂岩/泥岩组成 (Hathway, 2000; Riley et al., 2001)。区内出露的最老沉积地层是埃尔斯沃斯地 (Ellsworth Land) 晚古生代菲茨杰拉德组 (Fitzgerald Formation) 和 厄 文 组 (Erewhon Formation),含二叠系舌羊齿类化石 (Laudon, 1991; 陈廷愚等, 2008)。拉塔迪组出露在南极半 岛南部的拉塔迪盆地 (Latady Basin), 在白垩纪时 被拉塞特海岸花岗岩-辉长岩 (Lassiter Coast Intrusive Suite) 广泛侵入, 岩浆活动主要分为 3 期,分别是130~126 Ma, 118~113 Ma, 和108~ 102 Ma (Riley et al., 2018). Burton-Johnson and Riley (2015) 通过搜集整理南极半岛不同构造域 的地质、地球化学、地球物理等资料,提出南极 半岛不同构造域具有相同年代与地球化学特征的 变质基底,其上发育的地层也可对比,提出南极半 岛非外来地体拼贴组成,而是古太平洋板块持续俯 冲作用下发育在南极大陆边缘的典型的沟-弧-盆体 系,支持 Suárez (1976)最初提出的观点。

南极半岛的岩浆活动至少始于泥盆纪 (Riley et al., 2012) 并且持续到~23 Ma (Jordan et al., 2014),目前已发现两期主要的岩浆活动,第一期 可区分出3次与伸展有关的以酸性岩浆岩为主的岩 浆作用,分别发生于187~182 Ma、171~167 Ma和 157~153 Ma, 这些岩浆活动可能与冈瓦纳大陆的 裂解有关 (Riley et al., 2010)。第二期以钙碱性 与拉斑玄武岩为主,时代从早---中白垩世到中新 世 (Haase et al., 2012), 与古太平洋板块俯冲有 关。南设得兰群岛位于南极半岛北西端,布兰斯 菲尔德海峡 (Bransfield Strait) 在上新世之后将南 极半岛与南设得兰群岛分开(Haase et al., 2012)。 南设得兰群岛火山活动自早白垩世到中新世,呈 现出自西南向东北逐渐变年轻的趋势, 但这种趋 势在古近纪之后发生了变化,因为在利文斯顿岛 赫德半岛 (Hurd Peninsula) 以及雪岛总统角 (Present head, Snow Island)、罗伯特岛铜矿半岛 (Coppermine Peninsula, Robert Island) 等地出现了 古近纪的基性岩脉、岩墙,晚更新世以来火山活 动又开始活跃 (刘小汉和郑祥身, 1988; 李兆鼐 等, 1992; Haase et al., 2012)。

1.2 中—新生代古地磁研究

相关学者在南设得兰群岛与南极半岛开展了 比较丰富的古地磁研究。Blundell(1962)最早在 南极半岛开展了古地磁研究,通过对安第斯侵入 岩的古地磁研究获得了南极半岛白垩纪古地磁极 位置。Hamilton(1966)重新解释了Blundell (1962)的古地磁数据,提出已有的古地磁数据支 持南极半岛弧形构造是由构造变形导致。Dalziel et al.(1973)对南设得兰群岛利文斯顿岛 (Livingston Island)~40 Ma的侵入岩进行了古地磁 研究,提出南极半岛的弧形构造形成于~40 Ma 以 前,由于测年方法的限制,其提出的侵入岩年龄 可能不准确。Kellogg and Reynolds(1978)对南极 半岛南部的拉塞特海岸侵入岩进行了古地磁研究, 所有样品均为正极性,对其中3个样品中黑云母与 角闪石 K-Ar 定年得到平均年龄为 99 Ma,所以火 山岩形成于白垩纪超正极性带,结合 Blundell (1962) 和 Dalziel et al. (1973) 在南极半岛北部 的古地磁数据,认为南极半岛北部在~100 Ma 之 后没有发生相对运动。Watts (1982) 报道了乔治 王岛菲尔德斯半岛 (Fildes Peninsula, King George Island) 早始新世古地磁结果, 认为早始新世以 来, 南极半岛相对于东南极没有发生明显相对运 动。Watts et al. (1984) 对乔治王岛华沙半岛 (Warszawa Block) 埃斯库拉湾群与亨内克角群 (~ 49 Ma)、雪岛总统角岩脉 (~54 Ma)、格林威治 岛 (Greenwich Island) 侵入岩 (~82 Ma) 以及利 文斯顿岛拜尔斯半岛 (Byers Peninsula) 火山岩 (~96 Ma)进行了古地磁研究,对比东南极以及 Kellogg (1980) 在南极半岛南部奥维尔海岸 (Orville Coast) 古地磁结果,提出南极半岛北部与 奥维尔海岸从~100 Ma 至今没有发生相对运动。 Longshaw and Griffiths (1983) 对东格雷厄姆地侏 罗纪侵入岩与火山熔岩开展了古地磁研究,获得 了~175 Ma的古地磁极(48.0°S, 238.0°E, A₉₅= 9.5°)。Grunow (1993) 通过在南极半岛北部以及 南设得兰群岛古地磁研究,结合相关学者的数据, 获得了南极半岛-南设得兰群岛~155 Ma (64.0°S, 124. 0°E, $A_{95} = 7.1^{\circ}$) ~ ~140 Ma (60. 0°S, 50. 0° E, $A_{95} = 9.5^{\circ}$, ~ 130 Ma (74.0°S, 182.0°E, $A_{95} = 5.9^{\circ}$ \ ~ 110 Ma (71.0°S, 201.0°E, $A_{95} =$ 8.1°), ~ 100 Ma (85.0° S, 103.0° E, A_{95} = 6.0°) ~ 90 Ma (86.0°S, 152.0°E, A₉₅ = 7.5°) 和~50 Ma (78.0°S, 21.0°E, A_{os}=7.5°)的古地 磁极、在与东南极古地磁极进行对比后、提出南 极半岛相对于东南极在 175~155 Ma 之间发生了顺 时针旋转,与之对应的是威德尔海以及莫桑比克 和索马里盆地的打开。在155~130 Ma之间, 南极 半岛相对于东南极发生逆时针旋转,对应于威德 尔海盆扩张中心北移,并且 Grunow (1993) 认为 南极半岛东南部帕默地构造事件与威德尔海向南 极半岛的俯冲有关, 而现在威德尔海盆西南部可 能还残存有侏罗纪海盆。

Nawrocki et al. (2010) 对乔治王岛华沙半岛 火山岩开展了古地磁与同位素年代学研究,重新 厘定了华沙半岛内地层的年代,得到的数据显示 华沙半岛相对于东南极克拉通发生了逆时针旋转, 推断是由大型走滑断裂运动导致的局部构造旋转, 但 Poblete et al. (2011) 认为其多数火山岩数据没 有平均掉长期变,而非构造旋转引起的磁偏角异 常。Poblete et al. (2011) 在南设得兰群岛与南极 半岛北部部分地区开展了古地磁研究,结合 Grunow (1993) 和 Watts et al. (1984) 的数据, 排除掉南设得兰群岛与南极半岛之间存在相对旋 转以及火山岩长期变没有被平均掉的可能性后, 得到南设得兰群岛与南极半岛北部~60 Ma 与~90 Ma的古地磁极,重建了南极半岛与南美板块~60 Ma 与~90 Ma 的古构造位置,提出南极半岛北部 存在比较广泛的~90 Ma 的重磁化影响。Milanese et al. (2019, 2020) 在南极半岛东侧北端的詹姆 斯罗斯岛(James Ross Island)与内瓦多岛 (Nevado Island) 开展了古地磁研究,获得了南极 半岛~80 Ma的古地磁极,通过与相关学者数据进 行对比,支持南极半岛自~90 Ma 以来没有发生大 规模运动。而在内瓦多岛的古地磁研究显示其相 对于西摩岛 (Seymour Island) 与詹姆斯罗斯岛发 生了 47.9°±20.0°的逆时针旋转,通过对比西摩岛 与内瓦多岛古地磁偏角与地层走向发现两者变化 一致,因此将逆时针旋转归结为走滑断层引起的 地块旋转。

中国在南极半岛-南设得兰群岛的古地磁研究 始于上世纪80年代,早期的研究主要集中在长城 站所在的乔治王岛菲尔德斯半岛内, 1986年10月 到 1987 年 5 月期间, 金庆民等在菲尔德斯半岛采 集了古地磁样品,提出菲尔德斯半岛自始新世以 来向赤道方向移动了大约3°(冯宁生等,1989)。 1986年11月至1989年3月,郑祥身两次在菲尔德 斯半岛利用便携式汽油钻机采集了古地磁样品, 绘制了西南极自侏罗纪—白垩纪至始新世的视极 移曲线,初步讨论了冈瓦纳裂解过程中澳大利亚 与南极洲相对运动以及菲尔德斯半岛古地理位置 (刘椿等, 1991)。在这之后,中国在南极半岛-南 设德兰群岛的古地磁学研究中断, 直到 Gao et al. (2018) 通过中国第 31 次南极科学考察 (2014~ 2015年),对西南极南设得兰群岛乔治王岛菲尔德 斯半岛与利文斯顿岛拜尔斯半岛白垩纪—始新世 火山-沉积地层开展了系统的古地磁学、岩石磁 学、岩相学与40Ar/39Ar 同位素年代学研究,获得 了南极半岛早白垩世(~110 Ma) 与早始新世 (~55 Ma) 古地磁极; 通过玄武岩全岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 谱年龄将菲尔德斯半岛玛瑙滩组-长山组火山-沉 积地层形成年代限制在 56~52 Ma: 提出了南设德 兰群岛部分地层经历了重磁化影响;同时提出了 南极半岛南部的奥威尔海岸(Orville Coast),东埃 尔斯沃思地和瑟斯顿岛(Thurston Island)相对于 南极半岛北部(拜尔斯半岛与佩诺拉海峡)发生 了顺时针旋转,这可能与南极半岛中白垩世的帕 默地事件有关;重建了南极半岛与南美板块中白 垩世以来的古地理位置,提出南极半岛与南美板 块在110~55 Ma时连接在一起,并且共同经历了 顺时针旋转与南向移动。因此,自上世纪80~90 年代之后,中国在西南极的古地磁研究范围已扩 展到除菲尔德斯半岛以外的南设德兰群岛其他地 区,但遗憾的是尚未涉及到南设得兰群岛之外的 西南极其他地区。

2 瑟斯顿岛-埃茨海岸古地磁学研究

2.1 地质背景

瑟斯顿岛-埃茨海岸位于东经 255°~270°与南 纬71°~75°之间,发育于半地堑中的阿博特冰架 (Abbot Ice Shelf) 将瑟斯顿岛与埃茨海岸分开(图 2)。瑟斯顿岛-埃茨海岸主要出露了晚古生代--中 生代岛弧岩浆岩,是在古太平洋板块的持续俯冲 下形成的, 主要为钙碱性花岗闪长岩, 还包括花 岗岩、闪长岩、火山碎屑岩、火山凝灰岩与熔岩 流等,并且沿着两条东西走向平行于阿博特冰架 的断层分布 (White and Craddock, 1987; Pankhurst et al., 1993)。瑟斯顿岛的基底由晚石炭世花岗质 混合片麻岩组成,主要出露在瑟斯顿岛东部的摩 根湾 (Morgan Inlet) 和门泽尔岬 (Cape Menzel) (Leat et al., 1993)。片麻岩被后期的变形较弱的 细晶岩和伟晶岩脉以及基性岩脉和角闪辉长岩脉 切穿 (Pankhurst et al., 1993)。对片麻岩和细晶 岩、伟晶岩脉的 Rb-Sr 年代学研究分别获得 309± 5.0 Ma (MSWD 3.4,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr: 0.7040) 和 311 ± 3.0 Ma的年龄, 说明岩脉的侵入与基底变质基本 同期 (Pankhurst et al., 1993)。Riley et al. (2017) 对片麻岩中的锆石开展了年代学研究,获得花岗 岩形成年龄为 349 ± 2.0 Ma。锆石的 $\varepsilon_{\rm HF}$ 值位于 1.0±2.1~9.8±1.2之间,均值为6.2±1.2,对应 于~700 Ma 的亏损地幔模式年龄。较低的⁸⁷Sr/⁸⁶Si 值以及 ε_{Ndi} (-0.7~+2.1) 代表岩浆主要源于新生 下地壳,有古老地壳物质混染。晚石炭世变质基 底被晚古生代---早中生代的辉长岩--闪长岩侵入



a--南极不同地质单元地理位置; b--瑟斯顿岛-埃茨海岸简图; c--瑟斯顿岛地质简图

图 2 瑟斯顿岛-埃茨海岸地质简图 (据 Pankhurst et al., 1993修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Thurston Island-Eights Coast (modified after Pankhurst et al., 1993)

(a) Location of different geological domains of Antarctica; (b) Simplified map of Thurston Island-Eights Coast; (c) Simplified geological map of the Thurston Island

(Lopatin et al., 1972), 其主要出露在摩根湾、福 伊里山 (Mount Feury)、盖峰 (Guy Peaks) 和布 拉姆霍尔山 (Mount Bramhall) 等地, Pankhurst et al. (1993) 对从这些侵入岩中分离出的角闪石和 黑云母开展的 K-Ar、40 Ar-39 Ar、Rb-Sr 同位素年代学 研究,显示其形成年代集中在 286±8.0~220±6.0 Ma。对闪长岩中分离出的锆石开展 U-Pb 年代学支 持其形成年龄为 239±4.0 Ma (Riley et al., 2017)。 锆石的 ε_н 值位于 0.3±3.7~7.6±4.0 之间, 对应 于~950 Ma 的亏损地幔模式年龄, 代表其形成过 程有古老地壳混染 (Riley et al., 2017),⁸⁷Sr/⁸⁶Si= ~0.7067 以及 ε_{Nd} = -3.7 也支持古老地壳混染 (Pankhurst et al., 1993)。早侏罗世花岗岩主要分 布在埃茨海岸的琼斯山脉 (Jones Mountains), 全 岩 Rb-Sr 年龄为 198 ± 2.0 Ma (MSWD = 2.5; Pankhurst et al., 1993), 与白云母 K-Ar 年龄 (199± 6.0 Ma; Craddock et al., 1964; 183 ± 5.0 Ma, Pankhurst et al., 1993) 比较一致。瑟斯顿岛早— 中侏罗世的喷出岩和浅成侵入岩主要分布在岛的 中南部,其中的火山碎屑岩经历了广泛的低级变 质作用,斑晶与基质蚀变为绿泥石、阳起石、白 云母和绿帘石等矿物 (Pankhurst et al., 1993)。 Pankhurst et al. (1993) 从 6 个样品中获得全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 164±9.0 Ma。瑟斯顿岛晚侏罗 世—早白垩世花岗岩、花岗闪长岩与闪长岩主要 出露在西部 (White and Craddock, 1987), 全岩与 单矿物40Ar-39Ar和Rb-Sr年代学研究结果显示这些 岩石主要形成年代为 153±10.0~134±2 Ma。Riley et al. (2017) 对出露在黑尔冰川 (Hale Glacier) 的黑云母花岗岩锆石年代学研究确定其形成年代 为151±2 Ma, 对应的 ε_н 值位于-7.9±3.5~2.6± 2.2之间,代表亏损地幔模式年龄为860 Ma,说明 岩浆过程存在古老地壳混染。东部的早白垩世辉 长岩 - 花岗岩主要出露在贝尔纳普冰原岛峰 (Belknap Nunatak)、哈里森冰原岛峰 (Harrison Nunatak)、麦纳玛拉岛 (McNamara Island)、和达 斯廷岛 (Dustin Island), 其中黑云母和角闪石的 K-Ar、Rb-Sr 年龄集中在~125 Ma 以及~110 Ma。 中一晚白垩世的火山岩出露在琼斯山, 主要包括 火山碎屑岩、中酸性凝灰岩以及熔岩,所有岩石 都经历了后期热液蚀变影响,形成了绿泥石等蚀 变矿物。对其中部分英安岩、凝灰岩、集块岩和 霏细岩全岩开展的 Rb-Sr 研究获得三组年代学数 据,包括102±11.0 Ma、91±1.0 Ma和89±3.0 Ma, 考虑到所有样品都经历了后期蚀变影响,因此部 分年代学数据可能无法反映真实的成岩年龄 (Pankhurst et al., 1993)。位于埃茨海岸最东部的 勒普莱冰原岛峰(Lepley Nunatak)的花岗闪长岩 黑云母 K-Ar 与40 Ar-39 Ar 年代学研究也获得了晚白垩 世的年龄 (87±2 Ma 和 89±1 Ma; Pankhurst et al., 1993)。Riley et al. (2017) 对勒普莱冰原岛峰黑云 母花岗岩开展了锆石 U-Pb 年代学研究,确定其形成 年龄为 108±1.0 Ma, 对应的 ε_H 值位于-8.8±3.5 和 -1.2±2.3之间, 代表亏损地幔模式年龄为860 Ma, 说明岩浆形成过程经历了古老地壳的混染。

2.2 中生代古地磁研究

除了南极半岛古地磁研究从上世纪持续至今, 西南极其余地区古地磁研究大多停留在上世纪 90 年代,主要由"美国-英国联合西南极构造演化研 究计划"(United Kingdom-United States West Antarctic Tectonics Project) 和"美国-英国-新西 兰联合南太平洋边缘构造演化研究考察队" (United States-United Kingdom-New Zealand South Pacific Rim International Tectonics Expedition) 完成 (Dalziel and Pankhurst, 1987; Grunow et al., 1987, 1991; Grunow, 1987; DiVenere et al., 1994, 1995)。Scharnberger et al. (1972) 首先在瑟斯顿 岛-埃茨海岸开展了有限的古地磁研究,之后 Grunow 等人在瑟斯顿岛-埃茨海岸开展了较为系统 的古地磁研究 (728个样品, 114个采点), 采集 了自古生代至新生代,包括岩墙、岩脉、沉积岩 与变质岩样品。Grunow et al. (1987) 对白垩纪的 辉长岩、花岗岩开展了研究, 分离出了原生特征 剩磁分量,获得一个~125 Ma的古地磁极 (49.0° S, 232.0°E, A₉₅ = 7.9°; 图 2)。之后 Grunow et al. (1991) 又对剩余花岗闪长岩、闪长岩、火山 碎屑岩开展古地磁研究,获得了~230 Ma (61.0° S, 116.0°E, $A_{95} = 19.4^{\circ}$, ~ 175 Ma (67.0°S, 109.0°E), ~ 150 Ma (64.0°S, 145.0°E, $A_{95} =$ 7.0°), ~110 Ma (73.0°S, 210.0°E, $A_{95} = 7.6^{\circ}$) 和~90 Ma (80.0°S, 161.0°E, A₉₅ = 3.9°)的古 地磁极,建立了一条瑟斯顿岛-埃茨海岸三叠纪— 晚白垩世视极移曲线,对西南极不同地块开展了 古大陆重建,重点探讨了冈瓦纳大陆裂解、西南 极地块运动以及威德尔海打开等之间的关系。

3 玛丽·伯德地古地磁学研究

3.1 地质背景

玛丽·伯德地根据地质特征不同分为西部罗 斯区 (Ross Province) 和东部阿蒙森区 (Amundsen province) (Lopatin et al., 1972; Pankhurst et al., 1998: 图 3)。西部露头主要分布在福特岭 (Ford Ranges),出露玛丽·伯德地已知最老地层斯旺森 组 (Swanson Formation) 与福斯迪克杂岩 (Fosdick Complex) (Adams, 1986; 陈廷愚等, 2008)。其中 斯旺森组地层以灰色石英砂岩与页岩为主, 经受 了一定程度的变质作用,其中砂岩具有平行与交 错层理,可能为发育在深海沉积扇的浊流沉积 (Adams, 1986; 陈廷愚等, 2008)。福斯迪克杂岩 主要由片岩与片麻岩组成,出露在福斯迪克山脉 (Fosdick Mountains) 与海王星冰原岛峰 (Neptune Nunataks), 其起初被认为是形成于前寒武纪 (Adams, 1986), 但之后构造、岩性以及年代学证 据支持其为经历了白垩纪混合岩化改造的斯旺森 组 (Adams, 1986; 陈廷愚等, 2008)。斯旺森组板 岩的全岩 K-Ar 年龄分为 380~350 Ma 和 450~410 Ma两组,其中较年轻的一组年龄代表区内广泛分 布的晚泥盆世福特岭花岗闪长岩形成过程导致的 热变质作用, 而较老的一组年龄代表晚奥陶世区 内发生的一次低级变质作用 (Adams, 1986)。斯 旺森组板岩的全岩 Rb-Sr 年龄为~444 Ma, 支持晚 奥陶世的变质事件 (Adams, 1986)。从最浅变质 泥质岩中获得的 Rb-Sr 模式年龄为 593 Ma (Adams, 1986),因此斯旺森组的形成年代可能为 寒武纪—早奥陶世 (Mukasa and Dalziel, 2000)。 同样的岩石组合与变质事件在新西兰坎贝尔岛 (Campbell Island) 与新西兰南岛西海岸也有报道, 说明这些地区可对比,但斯旺森组的变质年代晚 于东南极的北维多利亚地与澳大利亚的塔斯马尼 亚相关地层的变质年代(晚寒武世—早奥陶世), 说明罗斯海两侧经历了不同过程的变质作用 (Adams, 1986)_°

玛丽·伯德地在晚泥盆世—早石炭世发育比



a---南极不同地质单元地理位置; b---玛丽·伯德地地质简图

图 3 玛丽·伯德地地质简图 (据 Mukasa and Dalziel, 2000 修改)

Fig. 3 Simplified geological map of Marie Byrd Land (modified after Mukasa and Dalziel, 2000)

(a) Location of different geological domains of Antarctica; (b) Simplified geological map of Marie Byrd Land

较广泛的岩浆活动,主要为 I 型花岗岩,但缺少罗 斯造山运动的地质记录(Adams, 1986; Mukasa and Dalziel, 2000)。在东玛丽·伯德地的鲁珀特海 岸(Ruppert Coast)发育一套中—晚泥盆世含植物 化石的沉积地层(Grindley, 1981),其上覆盖有以 安山岩为主的浅变质火山岩,K-Ar 年龄为 361~ 288 Ma(Lopatin et al., 1974),火山岩形成之后, 该区又经受了比较强的褶皱作用(Lopatin et al., 1974)。侏罗纪—白垩纪的岩浆活动发育,其中晚 侏罗世—早白垩世以 I 型花岗岩类以及相关的火山 岩为主,主要分布在派恩艾兰湾(Pine Island Bay)、科勒岭(Kohler Range)、鲁珀特海岸东部 与福特岭;中白垩世以 A 型花岗岩类以及基性岩 墙与岩脉为主(Mukasa and Dalziel, 2000),主要 分布在鲁珀特海岸。白垩纪与俯冲有关的钙碱性 花岗岩在约 110±1.0 Ma 时停止在东玛丽·伯德地 西部的鲁珀特海岸和霍布斯海岸 (Hobbs coasts) 发育,而在东部派恩艾兰湾的停止时间为 96±1.0 Ma,代表太平洋-凤凰板块向玛丽·伯德地的俯冲 是自西向东逐渐停止 (Mukasa and Dalziel, 2000)。 另外,鲁珀特海岸和霍布斯海岸白垩纪钙碱性花 岗岩经历了快速的 (~9 Ma)从俯冲型花岗岩 (110±1.0 Ma)向伸展型花岗岩 (101±1.0 Ma) 的转变,代表该区在~100 Ma 时经历了一次快速 的构造转换 (Mukasa and Dalziel, 2000)。

3.2 中生代古地磁研究

玛丽·伯德地古地磁采样点分布较广(图3), Grindley and Oliver (1983)首先在东玛丽·伯德地 的鲁珀特海岸和霍布斯海岸开展了古地磁研究, 从流纹岩与基性岩脉中采集了26个采点,获得一 个 112~91 Ma 的古地磁极 (66.0°S, 241.0°E, A₉₅: dp=8.7°, dm=8.8°), 通过与东南极同期古 地磁极对比后,推断玛丽·伯德地自中白垩世以 来相对东南极发生了 200~500 km 的北东向运动和 顺时针旋转。DiVenere et al. (1994, 1995) 在鲁珀 特海岸和霍布斯海岸开展了古地磁研究、从伊克 斯山脉 (Ickes Mountains)、麦当劳高地 (McDonald Heights)、佩特拉斯山 (Mount Petras)、 万斯山 (Mount Vance) 等地的正长岩、辉长岩和 花岗岩、玄武岩中获得了~100 Ma (75.7°S, 224. 1°E, $A_{95} = 3.8^{\circ}$, ~117 Ma (56.8°S, 185.6°E, A₉₅=8.7°)两个古地磁极。DiVenere et al. (1994) 与 Grindley and Oliver (1983) 获得的古地磁极位 置不一致,但是与南极半岛和瑟斯顿岛同期的古 地磁极互相重合,因此 DiVenere et al. (1994) 推 断 Grindley and Oliver (1983) 获得的数据可能受 到了地层倾斜的影响。Luyendyk et al. (1996)从 西玛丽·伯德地菲利普斯山脉 (Phillips Mountains)、 切斯特山脉 (Chester Mountains) 和福斯迪克山 29 个采点中获得一个~100 Ma的古地磁极 (70.5°S, 222.3°E; A₉₅ = 6.1°),其中泥盆纪—石炭纪花岗 闪长岩、英云闪长岩以及福斯迪克变质杂岩中的 片麻岩分离出的重磁化方向与从中白垩世岩脉中 获得的方向一致,代表玛丽·伯德地在~100 Ma 时经历了大范围的重磁化事件。Luyendyk et al. (1996)综合相关学者在南极半岛、玛丽·伯德地 和瑟斯顿岛~100 Ma的古地磁极,计算了一个西 南极平均古地磁极 (73.5°S, 215.2°E, A₉₅ = 4.0°)。通过与不同研究所报道的东南极古地磁极 进行对比后, Luyendyk et al. (1996) 提出选择不 同的东南极古地磁极可能得到东南极与西南极相 互运动过程截然相反的结论,其中 Grunow et al. (1991)选择的东南极古地磁极与西南极的古地磁 极在误差范围内互相重合,代表两地区自~100 Ma 以来缺少相对运动;然而 DiVenere et al. (1994) 和 Luvendyk et al. (1996) 选择的东南极古地磁极 显示自~100 Ma 以来西南极不同地块相对于东南 极发生了不同程度的顺时针旋转与纬向移动。

4 埃尔斯沃思-惠特莫尔山脉古地磁 学研究

4.1 地质背景

埃尔斯沃思-惠特莫尔山脉 (Ellsworth-

Whitmore Mountains) 位于南极半岛与横贯南极山 脉之间,根据岩性与构造解析,此区域被分为三 部分: 蒂埃尔山脉 (Thiel Mountains)、哈格冰原 岛峰 (Haag Nunataks) 和埃尔斯沃思-惠特莫尔山 脉(图4)。其中,蒂埃尔山脉为横贯南极山脉的 一部分,主要出露前寒武纪基底、早古生代花岗 岩、比肯超群以及弗拉尔粒玄岩岩床 (Storey and Dalziel, 1987)。哈格冰原岛峰主要出露前寒武纪 的正片麻岩 (Storey and Dalziel, 1987)。埃尔斯沃 思山脉至蒂埃尔山脉被进一步分为埃尔斯沃思山 脉构造域、边缘构造域以及沃拉德山(Mount Voollard) (Storey and Dalziel, 1987)。其中埃尔斯 沃思山脉构造域主要出露寒武纪—二叠纪的浅海 相沉积地层,后被花岗岩侵入,地层中发育了西 北-东南向的褶皱,褶皱时间可能为二叠纪--中 侏罗世之间 (Dalziel et al., 1987); 边缘构造域的 地层相比于埃尔斯沃思山脉构造域经历了更强烈 的构造变形。沃拉德山可能在构造上属于埃尔斯 沃思山脉构造域,但是其经历了更高级的变质作 用 (Storey and Dalziel, 1987)。构造变形产生的褶 皱与断层等的走向在埃尔斯沃思-惠特莫尔山脉的 边缘与内部不同地区不同,可能与埃尔斯沃思-惠 特莫尔山脉后期构造旋转有关(Dalziel et al., 1987)。埃尔斯沃思-惠特莫尔山脉的岩浆岩主要 包括中侏罗世的岩基与零星出现的火山岩与侵入 岩 (Dalziel et al., 1987)。其中后者主要包括寒武 纪的双峰式火山岩以及侵入寒武纪地层中与哈特 山 (Hart Hills) 变沉积岩中的辉长岩岩株与岩脉 (Dalziel et al., 1987)。中侏罗世的花岗岩尽管分 布广泛,但年代集中在~175 Ma,岩相学与地球化 学证据显示其为S型花岗岩,可能形成于陆内伸展 背景下的地壳熔融,同期岩浆作用也发生于横贯 南极山脉(弗拉尔粒玄岩岩床 Ferrar Supergroup)、 南非 (南非干旱台地高原溢流玄武岩 Karoo dolerites)、与南美(陶比发拉群 Tobifera Group 硅 质火山岩与达尔文组 S 型花岗岩 Darwin Granite Suite),代表了冈瓦纳超大陆裂解前广泛分布的一 次构造伸展背景下的岩浆事件 (Dalziel et al., 1987)

4.2 中生代古地磁研究

相关学者在埃尔斯沃思山脉、哈格冰原岛峰、哈特山、马丁山 (Martin Hills)、莫尔兰冰原岛峰 (Moreland Nunatak)、约翰斯山 (Mount Johns)、摩

+ 花岗岩岩体





90°W

图 4 埃尔斯沃思-惠特莫尔山地质简图 (据 Storey and Dalziel, 1987 修改)

Fig. 4 Simplified geological map of the Ellsworth-Whitmore Mountains (modified after Storey and Dalziel, 1987)

尔山 (Mount Moore)、沃拉德山、纳什山 (Nash Hills)、帕格诺冰原岛峰 (Pagano Nunatak)、皮 瑞特山 (Pirrit Hills)、惠特莫尔山脉等地开展了 古地磁研究,报道了寒武纪和中侏罗世(175 Ma) 两个古地磁极 (Grunow et al., 1987; Randall and Mac Niocaill, 2004; 图 4)。其中, 寒 武纪的古地磁数据显示埃尔斯沃思-惠特莫尔山 脉相对于东南极自寒武纪以来发生了约 90°的逆 时针旋转 (Randall and Mac Niocaill, 2004)。中 侏罗世古地磁极 (41.2°S, 232.2°E, A₉₅ = 5.3°) 与在南极半岛格雷厄姆地 (Graham Land) (48.0°S, 238.0°E, A₉₅ = 9.5°) 获得的同期古 地磁极互相重合,代表两地块在中侏罗世位置比 较接近。Grunow et al. (1987) 将这两个古地磁 极平均后,获得南极半岛-惠特莫尔山脉中侏罗 世平均古地磁极 (45.8°S, 237°E, A₉₅=6.4°)。 在与横贯南极山脉同期古地磁极(54.8°S, 220.3°E, A₉₅=3.9°)对比后显示南极半岛-埃 尔斯沃思山与横贯南极山脉之间自中侏罗世以来 存在约15°±10°的相对旋转。

古地磁是开展古大陆重建与构造演化研究必 不可少的手段之一,尽管西南极的古地磁与古大 陆重建研究始于上世纪中期,但由于极端恶劣的 野外工作环境以及地表露头较少、后勤支撑有限 等原因导致目前已发表的中生代以来的古地磁数 据依然非常少,尤其是瑟斯顿岛、玛丽·伯德地 和埃尔斯沃思-惠特莫尔山脉部分年代只有一个古 地磁极,数据的缺乏导致很难在同一地块对比验 证已发表的古地磁数据的可靠性 (表 1)。南极半 岛北部有较多的科考站,相对于西南极其他地区 在野外考察过程中更易获得后勤支撑,因此南极 半岛的古地磁数据相对丰富,但也主要集中在南 极半岛北部的中白垩世至早始新世(图5),缺少 白垩纪之前、中始新世以来的数据以及南极半岛 南部的数据,因此,文章只能根据已经报道的有 限的数据来对西南极不同地块开展古构造重建并 且讨论其构造演化意义。

为了探讨西南极各地块与东南极之间相对运 动,选取了东南极侏罗纪以来的视极移曲线 (Torsvik et al., 2012) 进行对比(图 5)。考虑到 南设得兰群岛曾被划分为西部构造域(Vaughan and Storey, 2000),可能是外来地体拼贴到南极半 岛,因此将南设得兰群岛与南极半岛古地磁数据 分开进行讨论。南极半岛~175 Ma的古地磁极是 从南极半岛东北部的奥斯卡二世海岸 (Oscar Ⅱ Coast)和科尔半岛(Cole Peninsula) 24 个采点 (82个样品)的花岗岩、花岗闪长岩和英云闪长岩 中获得,未经产状校正,两地区相距较远但古地 磁方向比较一致,说明区域内后期可能没有经历 太强烈的构造影响 (Longshaw and Griffiths, 1983), 这可能是由于采样区位于大西洋一侧,因此受到 太平洋板块俯冲影响较小。埃尔斯沃思-惠特莫尔 山脉~175 Ma的古地磁极是从纳什山(Nash Hills) 和帕格诺冰原岛峰(Pagano Nunatak) 8 个采点 (37个样品)的花岗岩、变沉积岩中获得,采样区 分散但是古地磁方向集中, 说明区内侏罗纪之后 的地层可能变形较弱(Grunow et al., 1987)。这两 个古地磁极的位置比较接近,说明南极半岛与埃 尔斯沃思-惠特莫尔山脉在~175 Ma时距离较近。 南极半岛~160 Ma的古地磁数据是从其太平洋边





LC--拉塞特海岸; OC--奥维尔海岸; EEL--东埃尔沃斯地

图 5 西南极不同地块中-新生代古地磁极与东南极视极移曲线等面积投影图

Fig. 5 Equal-area projection for Mesozoic-Cenozoic paleopoles of different crustal blocks of West Antarctica, and synthetic apparent polar wander path for East Antarctica

LC-Lassiter Coast; OC-Orville Coast; EEL-eastern Ellsworth Land

缘伯恩湾(Bone Bay)的花岗岩与基性岩脉中获得 (Grunow, 1993),由于无法确定古水平面,因此数 据没有经过产状校正,无法判断这个古地磁极是 否可靠。南设得兰群岛~155 Ma的古地磁极是从 沉积岩中获得的(Grunow, 1993),进行了地层产 状校正,通过了褶皱检验并且与其后的古地磁极 都不重合,可能代表了原生剩磁(图5)。南极半 岛伯恩湾与南设得兰群岛~160 Ma 与~155 Ma 古 地磁极在误差范围内互相重合(Grunow, 1993)。 伯恩湾位于南极半岛的最北端,布兰斯菲尔德海 峡将其与南设得兰群岛隔开,在布兰斯菲尔德海 可能属于南设得兰群岛的一部分,只是在菲尔德 斯海峡打开时没有随着南设德兰群岛分离出南极 半岛,这有待更多的地质证据验证,因此伯恩湾 的古地磁数据能否代表整个南极半岛就存在疑问。 Grunow(1993)报道的~130 Ma的古地磁极是从 南极半岛的杰拉许海峡(Gerlache Strait)的班克 山(Mount Banck)与拜尔斯半岛的斯梅利角 (Point Smellie)获得的,其中在班克山花岗岩 (~130 Ma, Rb-Sr全岩年龄)中分离出两个分量, 低温分量在 < 450 °C 解阻,对应的方向为 D = 21.6°, I = -70.4°,高温分量在 < 570 °C 解阻,对 应的方向为 D = 327.1°, I = -77.6°; 拜尔斯半岛斯

#8
щ. Т
±
移
汲
ŝ
*
秡
南
j K
N
Ш,
据
5
144
滾
厾
÷п
2
Ŧ
₩
翫
1
1
╈
钑
μ <u>π</u>
(EEC
臣
-
瞏

	чu
	Ċ
•	Ē
	1
	ę
	≒
	20
	Ξ
	÷
-	1
	+ -
	s,
	đ
r	÷
-	
	<u>.</u>
	Ξ
۰.	1
	1
- 7	ţ
	đ
	Ċ
	_
	1
	È.
-	÷
	Ξ
	╘
	ga
	≥
	-
	1
	è.
-	
	C
	Ċ
	_
	+ -
	á.
	ž
	æ
	č
	Ξ
	ρ
	đ
	c
•	Ē
	1
	÷
-	9
1	÷
	Д
	⊳
	ò
-	~
	Ξ
	\simeq
	G
	_
	ç
	e 1
	-
•	Ĕ
•	Ē
•	rette
•	arctic
•	tarctic
•	ntarctic
•	V ntarctic
	A ntarctic
•	A ntarctic
	st Antarctic
•	est Antarctic
•	est Antarctic
wr	Vest Antarctic
	West Antarctic
	West Antarctic
	n West Antarctic
	om West Antarctic
	"om West Antarctic
·····	trom West Antarctic
	trom West Antarctic
с	a from West Antarctic
	ta trom West Antarctic
	ata trom West Antarctic
	data from West Antarctic
	data from West Antarctic
	c data from West Antarctic
	ic data from West Antarctic
	stic data from West Antarctic
	etic data from West Antarctic
	netic data from West Antarctic
	gnetic data from West Antarctic
	agnetic data from West Antarctic
	nagnetic data from West Antarctic
	magnetic data from West Antarctic
	omagnetic data from West Antarctic
	comagnetic data from West Antarctic
	leomagnetic data from West Antarctic
	aleomagnetic data from West Antarctic
	oaleomagnetic data from West Antarctic
	paleomagnetic data from West Antarctic
	3 paleomagnetic data from West Antarctic
	ic paleomagnetic data from West Antarctic
	oic paleomagnetic data from West Antarctic
	zoic paleomagnetic data from West Antarctic
	ozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	lozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	snozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	enozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	Lenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	3-(Lenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	ic-Lenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	oic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	zoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	ozoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	sozoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	ssozoic-Lenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	esozoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	Viesozoic-Lenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	Mesozoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	Mesozoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	Mesozoic-Lenozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	l Mesozoic-Genozoic paleomagnetic data from West Antarctic
	I Mesozoic-Genozoic paleomagnetic data from West Antarctic

Table 1	Mesozoic-Cenozoic paleomagnetic data from West Antarctica and synthe	tic appare	ent polar war	nder path for	East Antarct	lica	
年代/	凶耕店	東上を		古地磁极		是否经过地层	参考
Ma	水井區	不尽致	经度 (°S)	纬度 (°E)	A ₉₅ / (°)	产状校正	文献
	南设得兰群岛 South Shetland Islands						
155	娄岛 Low Island	5	65.3	123. 9	6.5/8.9	围	Grunow, 1993
140	利文斯顿岛拜尔斯半岛 Byers Peninsula, Livingston Island	4	60.0	50.0	9.5	围	Grunow, 1993
120	利文斯顿岛拜尔斯半岛 Byers Peninsula, Livingston Island	1	63. 4	11.4	7.1	厝	Gao et al., 2018
107	利文斯顿岛拜尔斯半岛 Byers Peninsula, Livingston Island	ω	63. 2	331. 3	29.9	壃	Grunow, 1993
	南极半岛 Antarctic Peninsula						
175	东格雷厄姆地(南极半岛北部) East Graham Land	24	48.0	238.0	9.5	Κ¤	Longshaw and Griffiths, 1983
160	伯恩湾 Bone Bay	∞	64.5	125.4	8.2	K⊓	Grunow et al., 1991
110	姆特角 Moot Point	4	80. 3	167.6	8.1	K⊐	Grunow, 1993; Bakhmutov and Shpyra, 2011
06	南设得兰群岛与南极半岛北部 South Shetland Islands and Northern Antarctic Peninsula	50	86.8	113.0	3.4	K⊐	Poblete et al., 2011
55	南设得兰群岛与南极半岛北部 South Shetland Islands and Northern Antarctic Peninsula	40	85.0	45.5	5.6	围	Gao et al., 2018
27	凯尔盖朗群岛(南极板块) Kerguelen islands(AntarcticPlate)	233	85.3	9.3	2.3	壃	Camps et al. , 2007
108	奥维尔海岸与东埃尔沃斯地(南极半岛南部) Orville Coast and eastern Ellsworth Land (Southern Antarctic Peninsula)	13	70. 7	15.4	10.6	K⊐	Kellogg, 1980
100	拉塞特海岸(南极半岛南部) Lassiter Coast (Southern Antarctic Peninsula)	4	84. 3	5.5	21.6	КП	Kellogg and Rowley, 1978
	瑟斯顿岛-埃茨海岸 Thurston Island-Eights Coast						
230	布拉姆霍尔山 Mount Bramhall	${\mathfrak S}$	61.0	116.0	19.4	K⊓	Grunow et al., 1991
175	道林山 Mount Dowling	7	67. 0	109.0	I	壃	Grunow et al., 1991
150	登陆峰和辛普森山 Landfall Peak and Mount Simpson	S	64. 0	145.0	7.0	Kī	Grunow et al., 1991

续表1							
年代/	四耕必	あって		古地磁极		是否经过地层	参考
Ma	本件区	不点致 -	经度(°S)	纬度(°E)	A ₉₅ / (°)	产状校正	文献
125	贝尔纳普冰原岛峰 Belknap Nunatak	5	49. 0	232. 0	7.9	Ŕī	Grunow et al. , 1987a
110	达斯汀岛和麦克纳玛拉岛 Dustin Island and McNamara Island	٢	73. 0	210.0	7.6	K⊐	Grunow et al., 1991
60	勒普莱冰原岛峰和琼斯山脉 Lepley Nunatak and Jones Mountains	18	80. 0	161.0	3.9	Kī	Grunow et al. , 1991
	玛丽・伯徳地 Marie Byrd Land						
117	鲁珀特海岸和霍布斯海岸(东玛丽・伯德地) Ruppert and Hobbs Coast(Eastern Marie Byrd Land)	9	56. 8	185.6	8.7	围	DiVenere et al., 1995
100	鲁珀特海岸和霍布斯海岸(东玛丽・伯德地) Ruppert and Hobbs Coast(Eastern Marie Byrd Land)	19	75. 7	224. 1	3.8	重	DiVenere et al., 1994
100	菲利普斯山中东部、与福斯迪克山(西玛丽・伯德地) central and eastern Phillips and Fosdick Mountain (Western Marie Byrd Land)	29	70. 5	222. 3	6.1	垣	Luyendyk et al., 1996
	埃尔斯沃思 - 惠特莫尔山脉 Ellsworth-Whitmore Mountains						
175	纳什山和帕加诺冰原岛峰 Nash Hills and Pagano Nunatak	×	41. 2	232. 2	5.3	围	Grunow et al. , 1987
	东南极 East Antarctica						
20	视极移曲线		85.6	325.9	2.6	I	Torsvik et al., 2012
30	视极移曲线		84.9	314.9	2.6	I	Torsvik et al., 2012
40	视极移曲线		84.1	320.0	2.9	I	Torsvik et al., 2012
50	視极移曲线		82.9	351.7	2.8	I	Torsvik et al., 2012
09	弛极移曲线 迦椒移曲绘		83.6 84 1	17.8 35 4	2.1	1 1	Torevik et al. , 2012 Torevik et al. 2012
80	2.5~11~2、秋秋市会会の11~2、11~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~2~		86.7	34.6	2.9	I	Torsvik et al., 2012
06	视极移曲线		87.9	209.0	2.5	I	Torsvik et al., 2012
100	视极移曲线		84.9	202.0	3.3	I	Torsvik et al., 2012
110	视极移曲线		78.9	172.1	3.3	I	Torsvik et al., 2012
120	视极移曲线		75.9	183.6	2.6	I	Torsvik et al., 2012
130	视极移曲线		73. 7	178.7	2.8	I	Torsvik et al., 2012
140	视极移曲线		70.8	176.8	6.0	I	Torsvik et al., 2012
150	视极移曲线		67.5	201.7	6.4	I	Torsvik et al., 2012
160	视极移曲线		62.3	216.3	5.1	I	Torsvik et al., 2012
170	视极移曲线		62.8	218.9	4.6	I	Torsvik et al., 2012
180	视极移曲线		56.4	223. 2	3.4	I	Torsvik et al. , 2012

梅利角火山岩与沉积岩形成于~140 Ma,其中从火 山岩中获得的方向为 D=320.1°, I=-62.2°, 从沉 积岩中获得的方向为 D=24.5°, I=-66.9°, 均通 过了褶皱检验,但是火山岩中古地磁数据具有正 负极性,且通过了倒转检验,而沉积岩只存在正 极性,因此Grunow(1993)提出火山岩可能携带 了原生剩磁,而沉积岩遭受了后期重磁化,根据 地层褶皱时间推断重磁化事件发生在~130 Ma。 Grunow (1993) 使用班克山花岗岩与斯梅利角沉 积岩古地磁方向计算了一个~130 Ma的古地磁极, 考虑到班克山花岗岩的高温剩磁分量应该比低温 剩磁分量稳定,因此即使发生了重磁化也应该是 低温分量记录了后期的重磁化方向,并且斯梅利 角的沉积岩重磁化时间也没有很好的限定,因此 讨论中没有采用 Grunow (1993) ~130 Ma 的古地 磁极。南极半岛与南设得兰群岛获得的中白垩世 数据(120~100 Ma)存在明显差异(图 5),其中 南极半岛~110 Ma的古地磁数据是从姆特角 (Moot Point) 闪长岩中获得 (Grunow, 1993), 尽 管没有经过地层产状校正, 但是这个古地磁极在 误差范围内与东南极参考古地磁极十分接近。说 明两者之间在~110 Ma之后可能仅存在小规模的 相对运动 (图 5)。南设得兰群岛~120 Ma 与~107 Ma的古地磁数据是从火山熔岩与沉积岩中获得 (Grunow, 1993; Gao et al., 2018), 经过了产状校 正。南极半岛缺失~140 Ma 古地磁数据,南设得 兰群岛~140 Ma的古地磁数据能否代表整个南极 半岛还不确定,此时南设得兰群岛位于较低纬度, 而利文斯顿岛晚侏罗世—晚白垩世迈尔斯布拉夫组 (Miers Bluff Formation) 与南美安迪斯山脉早二叠 世—早白垩世迪克德约克混杂岩 (Duque de York Complex)的碎屑锆石具有相同的年龄峰值,代表 其具有可对比性 (Hervé et al., 2006)。南设得兰 群岛在 140~107 Ma 之间发生的顺时针旋转与南向 位移对应于南美最南端罗斯卡维德斯盆地 (Rocas Verdes basin) 顺时针打开以及安第斯山脉大型左 旋走滑断裂的运动 (Dalziel, 1981; Seymour et al., 2020)。107~90 Ma 期间南设得兰群岛发生了大规 模逆时针旋转 (图 5), 与大规模逆时针旋转背景 下罗斯卡维德斯盆地的关闭同期 (Dalziel, 1981; Poblete et al., 2016)。在此期间, 南美板块整体发 生了大规模的南向运动,对南设得兰群岛与南美 南端造成了挤压 (Gao et al., 2018), 这可能是导 致南设得兰群岛与安第斯山脉最南端发生逆时针 旋转的主要原因。而南极半岛在 110~90 Ma 期间 发生了小规模的顺时针旋转与南向位移(图6), 因此南设得兰群岛与南极半岛在早—中白垩世经 历了不同的板块运动过程,说明两者在当时可能 并非一个整体。南极半岛与南设得兰群岛在晚白 垩世 (~90 Ma) 之后古地磁极基本重合,并且靠 近东南极同期参考古地磁极 (图 5),说明他们之 间自~90 Ma之后缺少大规模的相对运动。



图 6 东南极与西南极在~120 Ma, ~100 Ma 和~90 Ma 时期的古大陆重建 Fig. 6 Plate reconstructions of East Antarctica and West Antarctica at ~120 Ma, ~100 Ma, and ~90 Ma

Kellogg and Rowley (1978) 从南极半岛南部的 拉塞特海岸 4 个采点(23 个样品)的花岗闪长岩、 闪长岩以及安山岩岩脉中获得一个~100 Ma的古 地磁极,没有经过地层产状校正。Kellogg(1980) 从南极半岛南部的奥维尔海岸与埃尔沃斯地 13 个 采点(92个样品)的花岗岩、花岗闪长岩与岩脉 中获得一个~108 Ma的古地磁极,样品取自不同 地区,但是各采点的方向比较一致,说明采样地 点在~108 Ma之后没有经历大范围的褶皱或者地 层倾斜。古地磁数据显示半岛南部的奥维尔海岸 相对于同时代的南极半岛北部地区发生了顺时针 旋转。Kellogg (1980) 提出顺时针旋转与埃尔斯 沃思断裂(Ellsworth fault)的右旋走滑有关。另 外,此处顺时针旋转也可能与南极半岛弧形构造 的形成有关, Vaughan et al. (2012) 在南极半岛 南部的帕默地识别出两期构造挤压事件,分别发 生在~107 Ma 与~103 Ma, 对应的主应力方向分别 为 341°与 259.5°。而对南极半岛不同时期的古地 磁数据分析, Grunow (1993) 提出南极半岛南北 部古地磁数据的差异是由于南极半岛在不同时期 发生板块运动导致的, 与弧形构造的形成无关。 但是 Gao et al. (2018) 在将南极半岛北部发表的 117~104 Ma 的古地磁数据分析后发现~110 Ma 的 古地磁极与东南极的参考古地磁极位置比较一致。 但是南极半岛南部的奥维尔海岸~108 Ma的古地 磁数据相对于南极半岛北部仍表现出较大规模的 顺时针旋转。因此, 南极半岛的弧形构造可能是 ~108 Ma 之后形成的。马尼希基海底高原 (Manihiki Plateau) 是太平洋板块翁通爪哇-马尼希基-希库 朗基 (Ontong Java-Manihiki-Hikurangi) 大火成岩 省的一部分,在105~100 Ma 与南极半岛南部帕默 地发生俯冲碰撞 (Hochmuth and Gohl, 2017), 与 "帕默地事件"时间接近 (Vaughan et al., 2012), 这可能导致了南极半岛南部弧形构造的形成。 DiVenere et al. (1994) 曾将南极半岛南部与北部 的数据平均后获得~106 Ma的南极半岛古地磁极, 它与瑟斯顿岛-埃茨海岸和玛丽·伯德地约同时期 的古地磁极位置接近,因此 DiVenere et al. (1994) 计算了这三个地块的平均古地磁极, 但是 南极半岛南部与北部可能存在相对运动,因此, 平均后的数据消除了两地区之间的相对运动,并 不适合代表南极半岛~106 Ma的位置。

瑟斯顿岛-埃茨海岸~230 Ma 的古地磁极是从 布拉姆霍尔山 3 个采点(18 个样品)的花岗闪长 岩与闪长岩中获得,未经过地层校正(Grunow et al.,1991)。~175 Ma 的古地磁极是从道林山 (Mount Dowling) 2 个采点(12 个样品)的火山碎 屑岩中获得,通过了烘烤检验,没有褶皱检验, 并且进行了地层校正,校正前(D = 56°, I = ~76.3°)后(D = 16.3°, I = -67.6°)的古地磁方 向有一定差距(Grunow et al.,1991)。因此, ~230 Ma 未经地层产状校正的古地磁极可能并不 可靠。~150 Ma 的古地磁极是从兰德福峰 (Landfall Peak) 和辛普森山 (Mount Simpson) 5 个采点(30个样品)的花岗岩、闪长岩与花岗闪 长岩中获得, 未经过地层产状校正 (Grunow et al., 1991)。~125 Ma的古地磁极是从贝尔纳普冰 原岛峰5个采点(34个样品)的辉长岩、花岗岩 脉与基性岩脉中获得 (Grunow et al., 1991), 未经 过地层产状校正。除此以外, Grunow et al. (1991) 在瑟斯顿岛-埃茨海岸还获得了~123 Ma, ~142 Ma 和~145 Ma 的古地磁极,由于这些数据 没有很好的年代学限制,所以没有被采用,但是~ 142 Ma的古地磁极靠近~150 Ma的古地磁极,~ 120 Ma的古地磁极也互相靠近,这些样品的采集 地区相对分散,但都显示了比较低的古纬度,这 说明尽管此区地层可能发生了倾斜,但是规模可 能并不大。~110 Ma的古地磁极是从达斯廷岛和 麦纳玛拉岛7个采点(44个样品)的闪长岩和辉 长岩中获得,未经过地层产状校正 (Grunow et al., 1991)。~90 Ma 的古地磁极是从勒普莱冰原 岛峰和琼斯山脉 18 个采点 (102 个样品)的花岗 岩、长英质岩脉与基性岩脉中获得,未进行过地 层产状校正 (Grunow et al., 1991)。这两个古地磁 极靠近南极半岛与玛丽·伯德地同时期的古地磁 极,因此也可能仅经历了比较有限的地层倾斜的 影响(图5)。瑟斯顿岛-埃茨海岸175~150 Ma的 古地磁极位置比较接近, 而~125 Ma 的古地磁极 与~150 Ma的古地磁极相距较远(图5),显示瑟 斯顿岛-埃茨海岸 150~125 Ma 期间发生了大规模 逆时针旋转。125~90 Ma 瑟斯顿岛-埃茨海岸又发 生了大规模顺时针旋转与快速的南向位移(图6), 说明瑟斯顿岛-埃茨海岸在~125 Ma发生了一次构 造转换。

由于西玛丽·伯德地晚古生代浊流沉积以及 泥盆纪花岗闪长岩与东南极的北维多利亚地以及 新西兰西部地块同期岩石地层单元可进行对比, 而东玛丽·伯德地、新西兰东部地块与南极半岛 以及南美相关地层可互相对比(Dalziel and Grunow, 1985; DiVenere et al., 1995),因此 DiVenere et al. (1995)在其重建中将西玛丽·伯 德地与新西兰西部地块置于北维多利亚地附近, 而将东玛丽·伯德地与西新兰东部地块置于瑟斯 顿岛-埃茨海岸附近。东玛丽·伯德地~117 Ma的 古地磁极是从鲁珀特海岸与霍布斯海岸的万斯/勒 马叙里耶山(Mount Vance/LeMasurier)6个采点 (38个样品)的火山岩中获得,通过了烘烤检验, 进行了地层产状校正 (DiVenere et al., 1995)。东 玛丽 · 伯德地~100 Ma 的古地磁极 (75.7°S, 224.1°E, A₀₅=3.8°) 是从鲁珀特海岸与霍布斯海 岸19个采点(109个样品)的闪长岩和辉长岩样 品中获得,通过了褶皱检验 (DiVenere et al., 1994)。西玛丽·伯德地~100 Ma的古地磁极是从 菲利普斯山脉、柴斯特山脉和福斯迪克山 29 个采 点中获得,识别出~100 Ma 的重磁化方向,与东 玛丽·伯德地同时期的古地磁方向在误差范围内 基本一致。重磁化时间这与该区发生自挤压到伸 展的构造转变时间基本一致 (Mukasa and Dalziel, 2000)。类似的重磁化事件也发生在东南极的北维 多利亚地 (Lanza and Zanella, 1993) 以及澳大利 亚东南部 (Schmidt and Embleton, 1981)。古大陆 重建显示东玛丽·伯德地远离南极其他地区,并 且在 117~100 Ma 之间发生了较大规模的南向运动 与逆时针旋转,东玛丽·伯德地向南运动对应于 其内广泛分布的 110~100 Ma 古太平洋板块俯冲作 用下产生钙碱性岩浆岩 (Mukasa and Dalziel, 2000)。因此, 120~100 Ma 期间在西南极可能发 生了一次比较快速,且影响范围广泛的构造事件, 导致东玛丽·伯德地与瑟斯顿岛-埃茨海岸发生了 大规模南向运动(图6)。120~100 Ma 快速的板块 运动对应了太平洋板块翁通爪哇-马尼希基-希库 朗基大火成岩省的喷发以及全球洋壳扩张速率的 高峰期 (Larson, 1991; 李三忠等, 2019), 东玛 丽·伯德地与瑟斯顿岛-埃茨海岸位于南极大陆环 太平洋部分,因此其快速且大规模的南向位移可 能与太平洋中白垩世大火成岩省的喷发导致的洋 壳快速扩张有关。玛丽·伯德地东、西两部分~ 100 Ma的古地磁极互相重合,并且远离东南极同 时期参考古地磁极,说明这两部分在~100 Ma 已 经拼贴在一起,对应于太平洋板块洋壳生长速率 的突然降低 (Larson, 1991)。南极半岛在 120~100 Ma 似乎没有发生大规模的板块运动, 但是岩浆记 录显示~120 Ma的岩浆活动已经从中部构造域以 西的 帕默 地 迁 移 到 东 部 构 造 域 的 拉 塞 特 海 岸 (Riley et al., 2018), 代表在此期间古太平洋板块 在南极半岛发生了比较强烈的平板俯冲作用,因 此南极半岛同样受到了太平洋中白垩世大火成岩 省的喷发的影响。如果南极半岛在这段时间仅仅 发生了经度上的变化,古地磁数据将难以识别出

这次大火成岩省的喷发对南极半岛板块运动造成 的影响。

瑟斯顿岛-埃茨海岸与玛丽・伯德地在 100~ 90 Ma 发生了北向位移, 而南极半岛在这段时间发 生了小规模的顺时针旋转(图 6)。玛丽·伯德地 发育了中白垩世伸展背景下的花岗岩与基性岩脉, 对应于古大陆重建显示的板块裂解 (Weaver et al., 1994; Adams et al., 1995)。在东玛丽·伯德 地福特岭发育的以岩浆岩为核心的片麻岩穹隆也 记录了 105~94 Ma 期间发生的快速抬升冷却, 岩 相学与构造研究证实这与岩浆的底辟作用有关 (Siddoway et al., 2004)。鲁珀特海岸和霍布斯海 岸 A 型正长岩年代学研究显示裂谷作用开始于~ 101 Ma, 这与古太平洋-凤凰板块洋中脊 (Pacific-Phoenix Ridge) 俯冲至西南极的时间一致,裂谷作 用的进一步发展最终导致了大新西兰 (包括坎贝 尔高原 Campbell Plateau, 查塔姆高地 Chatham Rise, 北岛 North Island, 和南岛 South Island) 与玛 丽·伯德地之间~81 Ma 洋壳的形成以及最终的分 离 (Cande et al., 1995; Mukasa and Dalziel, 2000)。瑟斯顿岛-埃茨海岸~90 Ma的古地磁极远 离南极半岛与东南极同时期的古地磁极, 代表瑟 斯顿岛-埃茨海岸与玛丽·伯德地可能相对于东南 极与南极半岛在~90 Ma之后发生了一定规模的相 对运动。因此~100 Ma之后西南极相对于东南极 的运动主要集中在瑟斯顿岛-埃茨海岸与玛丽·伯 德地,对应于中--晚白垩世西南极罗斯海地区的 构造伸展作用。罗斯海地区在 43~26 Ma 期间又发 生了地壳伸展,导致西南极相对于东南极在罗斯 海北部发生了~200 km 的相对运动 (Cande et al., 2000),这可能进一步导致了西南极瑟斯顿岛-埃 茨海岸与玛丽·伯德地晚白垩世的古地磁极远离 东南极的同时期参考古地磁极。

6 结论

古地磁数据支持西南极不同地区在中生代经 历了复杂的板块运动过程,并且相对东南极克拉 通发生了不同程度相对运动。其中,瑟斯顿岛-埃 茨海岸与玛丽·伯德地在 120~100 Ma 期间都发生 了大规模南向移动,对应着太平洋板块翁通爪哇-马尼希基-希库朗基大火成岩省的喷发以及全球洋 壳扩张速率的高峰期。而~100 Ma 以来瑟斯顿岛- 埃茨海岸、东玛丽·伯德地向北运动而南极半岛 向南运动与顺时针旋转可能与古太平洋板块-凤凰 板块洋中脊在西南极的俯冲以及西南极裂谷带的 形成有关。南设得兰群岛是从南美安第斯山脉分 离出来后逐渐拼贴到南极半岛的,其板块运动与 安第斯山脉的构造演化息息相关。因此,古地磁 数据记录了西南极不同地质单元拼贴-裂离南极大 陆的过程,是理解大洋板块与大陆板块相互作用 过程的理想地区,对其开展深入研究有助于进一 步理解南极大陆形成过程、南太平洋构造演化历 史及其地球动力学机制。

致谢:感谢特邀主编刘晓春研究员在成文过 程中的大力帮助,感谢审稿人提出的宝贵意见。

References

- ADAMS C J, 1986. Geochronological studies of the Swanson Formation of Marie Byrd Land, West Antarctica, and correlation with northern Victoria Land, East Antarctica, and South Island, New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 29 (3): 345-358.
- ADAMS C J, SEWARD D, WEAVER S D, 1995. Geochronology of Cretaceous granites and metasedimentary basement on Edward VII Peninsula, Marie Byrd Land, West Antarctica [J]. Antarctic science, 7 (3): 265-276.
- BAKHMUTOV V, SHPYRA V, 2011. Palaeomagnetism of Late Cretaceous-Paleocene igneous rocks from the western part of the Antarctic Peninsula (Argentine Islands Archipelago) [J]. Geological Quarterly, 55 (4): 285-300.
- BELL A C, KING E C, 1998. New seismic data support Cenozoic rifting in George VI Sound, Antarctic Peninsula [J]. Geophysical Journal International, 134 (3): 889-902.
- BLUNDELL D J, 1962. Palaeomagnetic investigations in the Falkland Island Dependencies [M] //British Antarctic Survey Scientific Reports, 39, 1-24.
- BURTON-JOHNSON A, RILEY T R, 2015. Autochthonous v. accreted terrane development of continental margins: a revised in situ tectonic history of the Antarctic Peninsula [J]. Journal of the Geological Society, 172 (6): 822-835.
- CAMPS P, HENRY B, NICOLAYSEN K, et al., 2007. Statistical properties of paleomagnetic directions in Kerguelen lava flows: Implications for the late Oligocene paleomagnetic field [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112, B06102, doi: 10.1029/2006JB004648.
- CANDE S C, RAYMOND C A, STOCK J, et al., 1995. Geophysics of the Pitman Fracture Zone and Pacific-Antarctic plate motions during the Cenozoic [J]. Science, 270 (5238): 947-953.
- CANDE S C, STOCK J M, MÜLLER R D, et al., 2000. Cenozoic motion between east and west Antarctica [J]. Nature, 404

(6774): 145-150.

- CHEN T Y, SHEN Y B, ZHAO Y, et al., 2008. Geological Development of Antarctica and Evolution of Gondwanaland [M]. Beijing: The Commercial Press. (in Chinese)
- CRADDOCK C, CAST P W, HANSON G N, et al., 1964. Rubidium-strontium ages from Antarctica [J]. GSA Bulletin, 75 (3): 237-240.
- DALZIEL I W D, KLINGFIELD R, LOWRIE W, et al, 1973. Paleomagnetic data from the southernmost Andes and the Antarctandes [M] //TARLING D H, RUNCOM SK. Implications of continental drift to the earth sciences. San Diego: Academic Press: 87-101.
- DALZIEL I W D, 1981. Back-arc extension in the southern Andes: a review and critical reappraisal [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 300 (1454): 319-335.
- DALZIEL I W D, 1982. The early (pre-Middle Jurassic) history of the Scotia arc region: a review and progress report M] //CRADDOCK C Antarctic geoscience. Madison: University of Wisconsin Press: 111-126.
- DALZIEL I W D, GRUNOW A M, 1985. The Pacific margin of Antarctica: Terranes within terranes within terranes [M]. // Howell, D. G. et al. ed. Circum Pacific terranes Conference.
 AAPG Special Publication, Earth Science Series n. 1: 555-561.
- DALZIEL I W D, GARRETT S W, GRUNOW A M, et al., 1987. The Ellsworth-Whitmore Mountains crustal block: its role in the tectonic evolution of West Antarctica [M] //MCKENZIE G D. Gondwana six: structure, tectonics, and geophysics. Washington, DC: American Geophysical Union, 40: 173-182.
- DALZIEL I W D, PANKHURST R J, 1987. Joint U. K. -U. S. West Antarctic tectonic project: an introduction [M] //MCKENZIE G
 D. Gondwana six: structure, tectonics, and geophysics. Washington, DC: American Geophysical Union, 40: 107-108.
- DIVENERE V J, KENT D V, DALZIEL I W D, 1994. Mid-Cretaceous paleomagnetic results from Marie Byrd Land, West Antarctica: A test of post-100 Ma relative motion between East and West Antarctica [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99 (B8): 15115-15139.
- DIVENERE V, KENT D V, DALZIEL I W D, 1995. Early Cretaceous paleomagnetic results from Marie Byrd Land, West Antarctica: Implications for the Weddellia collage of crustal blocks [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100 (B5): 8133-8151.
- FENG N S, JIN Q M, WANG L B, et al., 1989. Paleomagnetic characteristics and geological significance of Cenozoic volcanic rock series from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica [J]. Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 10 (2): 15-25. (in Chinese with English abstract)

FERRACCIOLI F, JONES P C, VAUGHAN A P M, et al., 2006. New aerogeophysical view of the Antarctic Peninsula: More pieces, less puzzle [J]. Geophysical Research Letters, 33 (5): L05310.

FITZSIMONS I C W, 2000. Grenville-age basement provinces in East

Antarctica: evidence for three separate collisional orogens [J]. Geology, 28 (10): 879-882.

- GAO L, ZHAO Y, YANG Z Y, et al., 2018. 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, 123 (1): 4-30.
- GRINDLEY G W, 1981. Geological background to a Devonian plant fossil discovery, Ruppert Coast, Marie Byrd Land, West Antarctica [M] //M. M. Cresswell, P. Vella (Eds.), Gondwana Five. A. A. Balkema; Rotterdam; 23-30.
- GRINDLEY G W, OLIVER, P J, 1983. Palaeomagnetism of Cretaceous volcanic rocks from Marie Byrd Land, Antarctica
 [M] //OLIVER R L, JAMES P R, JAGO J B. Antarctic earth science. Canberra: Australian Academy of Science: 573-578.
- GRUNOW A M, DALZIEL I W, KENT D V, 1987. Ellsworth-Whitmore Mountains crustal block, western Antarctica: newpaleomagnetic results and their tectonic significance [M] // MCKENZIE G D. Gondwana six: structure, tectonics, and geophysics. Washington, DC: American Geophysical Union.
- GRUNOW A M, KENT D V, DALZIEL I W D, 1987. Mesozoic evolution of West Antarctica and the Weddell Sea Basin: new paleomagnetic constraints [J]. Earth and Planetary Science Letters, 86 (1): 16-26.
- GRUNOW A M, KENT D V, DALZIEL I W D, 1991. New paleomagnetic data from Thurston Island: Implications for the tectonics of West Antarctica and Weddell Sea opening [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96 (B11): 17935-17954.
- GRUNOW A M, 1993. New paleomagnetic data from the Antarctic Peninsula and their tectonic implications [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98 (B8): 13815-13833.
- HAASE K M, BEIER C, FRETZDORFF S, et al., 2012. Magmatic evolution of the South shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163 (6): 1103-1119.
- HAMILTON W, 1966. Tectonics of Antarctica [J]. Tectonophysics, 4 (4-6): 555-568.
- HATHWAY B, DUANE A M, CANTRILL D J, et al., 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 (4): 593-606.
- HATHWAY B, 2000. Continental rift to back-arc basin: Jurassic-Cretaceous stratigraphical and structural evolution of the Larsen Basin, Antarctic Peninsula [J]. Journal of the Geological Society, 157 (2): 417-432.
- HERVÉ F, MILLER H, PIMPIREV C, 2006. Patagonia-Antarctica connections before Gondwana break-up [M] //FÜTTERER D K, DAMASKE D, KLEINSCHMIDT G, et al. Antarctica. Berlin: Springer: 217-227, doi: 10.1007/3-540-32934-X_ 26.
- HOCHMUTH K, GOHL K, 2017. Collision of Manihiki Plateau fragments to accretional margins of northern Andes and Antarctic

Peninsula [J]. Tectonics, 36 (2): 229-240.

- HOLDSWORTH B K, NELL P A R, 1992. Mesozoic radiolarian faunas from the Antarctic Peninsula: age, tectonic and palaeoceanographic significance [J]. Journal of the Geological Society, 149 (6): 1003-1020.
- JORDAN T A, NEALE R F, LEAT P T, et al., 2014. Structure and evolution of Cenozoic arc magmatism on the Antarctic Peninsula: a high resolution aeromagnetic perspective [J]. Geophysical Journal International, 198 (3): 1758-1774.
- KELLOGG K S, 1980. Paleomagnetic evidence for oroclinal bending of the southern Antarctic Peninsula [J]. GSA Bulletin, 91 (7): 414-420.
- KELLOGG K S, REYNOLDS R L, 1978. Paleomagnetic results from the Lassiter Coast, Antarctica, and a test for oroclinal bending of the Antarctic Peninsula [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 83 (B5): 2293-2299.
- LANZA R, ZANELLA E, 1993. Palaeomagnetism of the Ferrar dolerite in the northern Prince Albert Mountains (Victoria Land, Antarctica) [J]. Geophysical Journal International, 114 (3): 501-511.
- LARSON R L, 1991. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume [J]. Geology, 19 (6): 547-550.
- LAUDON T S, 1991. Petrology of sedimentary rocks from the English Coast, eastern Ellsworth Land [M] //M. R. A. Thomson, J. A. Crame, J. W. Thomson (Eds.), Geological Evolution of Antarctica, Cambridge University Press, Cambridge, UK: 455-460.
- LEAT P T, STOREY B C, PANKHURST R J, 1993. Geochemistry of Palaeozoic-Mesozoic Pacific rim orogenic magmatism, Thurston Island area, West Antarctica [J]. Antarctic Science, 5 (3): 281-296.
- LI S Z, CAO X Z, WANG G Z, et al., 2019. Meso-Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific plate [J]. 25 (5): 642-677. (in Chinese with English abstract)
- LI Z N, ZHENG X S, LIU X H, et al., 1992. Uolcanic rocks of the Fildes Peninsula, King George Island, west Antarctica [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LIU C, ZHU R X, ZHENG X S, et al., 1991. Paleomagnetism of the Late Cretaceous and Early Tertiary rocks from Fildes Peninsula, West Antarctica, and its geotectonic significance [J]. Antareric Research, 3 (2): 136-143. (in Chinese with English abstract)
- LIU X C, JAHN B M, ZHAO Y, et al., 2006. Late Pan-African granitoids from the Grove Mountains, East Antarctica: age, origin and tectonic implications [J]. Precambrian Research, 145 (1-2): 131-154.
- LIU X C, 2018. Deciphering multiple metamorphic events in high-grade metamorphic terranes: A case from the Amery area of East Antarctica [J]. Acta Petrologica Sinica, 34 (4): 925-939. (in Chinese with English abstract)
- LIU X H, ZHENG X S, 1988. Geology of volcanic rocks on Fildes Peninsula, King George Island, West Antarctica [J]. Antarctic Research, 1 (1): 25-35. (in Chinese with English abstract)
- LIU X H, ZHAO Y, LIU X C, et al., 2003. Geology of the grove

mountains in East Antarctica. Science in China Series D: Earth Sciences, 46 (4): 305-319.

- LONGSHAW S K, GRIFFITHS D H, 1983. A palaeomagnetic study of Jurassic rocks from the Antarctic Peninsula and its implications [J]. Journal of the Geological Society, 140 (6): 945-954.
- LOPATIN B G, ORLENKO E M, ADIE R J, 1972. Outline of the geology of Marie Byrd Land and the Eights Coast [M] //Antarctic Geology and Geophysics, edited by R. J. Adie, Universitetesfodaget, Oslo: 843-847.
- LOPATIN B G, KRYLOV A Y, ALIAPYSHEV O A, 1974. Main tectonomagmatic stages of development of Marie Byrd Land and Eights Coast, West Antarctic, according to radioactive data [J]. Antarktika, 13: 52-61.
- LUYENDYK B, CISOWSKI S, SMITH C, et al., 1996. Paleomagnetic study of the northern Ford Ranges, western Marie Byrd Land, West Antarctica: Motion between West and East Antarctica [J]. Tectonics, 15 (1): 122-141.
- MILANESE F N, OLIVERO E B, RAFFI M E, et al., 2019. Mid Campanian-Lower Maastrichtian magnetostratigraphy of the James Ross Basin, Antarctica: Chronostratigraphical implications [J]. Basin Research, 31 (3): 562-583.
- MILANESE F N, OLIVERO E B, SLOTZNICK S P, et al., 2020. Coniacian-Campanian magnetostratigraphy of the Marambio Group: The Santonian-Campanian boundary in the Antarctic Peninsula and the complete Upper Cretaceous-Lowermost Paleogene chronostratigraphical framework for the James Ross Basin [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 555: 109871.
- MUKASA S B, DALZIEL I W D, 2000. Marie Byrd Land, West Antarctica: Evolution of Gondwana's Pacific margin constrained by zircon U-Pb geochronology and feldspar common-Pb isotopic compositions [J]. GSA, 112 (4): 611-627.
- NAWROCKI J, PAŃCZYK M, WILLIAMS I S, 2010. Isotopic ages and palaeomagnetism of selected magmatic rocks from King George Island (Antarctic Peninsula) [J]. Journal of the Geological Society, 167 (5): 1063-1079.
- PANKHURST R J, MILLAR I L, GRUNOW A M, et al., 1993. The pre-Cenozoic magmatic history of the Thurston Island crustal block, West Antarctica [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98 (B7): 11835-11849.
- PANKHURST R J, WEAVER S D, BRADSHAW J D, et al., 1998. Geochronology and geochemistry of pre-Jurassic superterranes in Marie Byrd Land, Antarctica [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103 (B2): 2529-2547.
- POBLETE F, ARRIAGADA C, ROPERCH P, et al., 2011. Paleomagnetism and tectonics of the South Shetland Islands and the northern Antarctic Peninsula [J]. Earth and Planetary Science Letters, 302 (3-4): 299-313.
- POBLETE F, ROPERCH P, ARRIAGADA C, et al., 2016. Late Cretaceous-early Eocene counterclockwise rotation of the Southern Patagonian Andes and evolution of the Patagonia-Antarctic Peninsula system [J]. Tectonophysics, 668-669: 15-34.
- RANDALL D E, MAC NIOCAILL C, 2004. Cambrian palaeomagnetic

data confirm a Natal Embayment location for the Ellsworth—Whitmore Mountains, Antarctica, in Gondwana reconstructions [J]. Geophysical Journal International, 157 (1): 105-116.

- RILEY T R, LEAT P T, PANKHURSTR J, et al., 2001. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting [J]. Journal of Petrology, 42 (6): 1043-1065.
- RILEY T R, FLOWERDEW M J, HUNTER M A, et al., 2010. Middle Jurassic rhyolite volcanism of eastern Graham Land, Antarctic Peninsula: age correlations and stratigraphic relationships [J]. Geological Magazine, 147 (4): 581-595.
- RILEY T R, FLOWERDEW M J, WHITEHOUSE M J, 2012. U-Pb ion-microprobe zircon geochronology from the basement inliers of eastern Graham Land, Antarctic Peninsula [J]. Journal of the Geological Society, 169 (4): 381-393.
- RILEY T R, FLOWERDEW M J, PANKHURST R J, et al., 2017. A revised geochronology of Thurston Island, West Antarctica, and correlations along the proto-Pacific margin of Gondwana [J]. Antarctic Science, 29 (1): 47-60.
- RILEY T R, BURTON-JOHNSON A, FLOWERDEW M J, et al., 2018. Episodicity within a mid-Cretaceous magmatic flare-up in West Antarctica: U-Pb ages of the Lassiter Coast intrusive suite, Antarctic Peninsula, and correlations along the Gondwana margin [J]. GSA Bulletin, 130 (7-8): 1177-1196.
- SCHARNBERGER C K, SCHARON L, 1972. Paleomagnetism and plate tectonics of Antarctica [M] //Antarctic Geology and Geophysics, edited by RJ Adie, Universitetesforlaget, Oslo: 843-847.
- SCHMIDT P W, EMBLETON B J J, 1981. Magnetic overprinting in southeastern Australia and the thermal history of its rifted margin [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86 (B5): 3998-4008.
- SEYMOUR N M, SINGLETON J S, MAVOR S P, et al, 2020. The relationship between magmatism and deformation along the intra-arc strike-slip Atacama fault system, northern Chile [J]. Tectonics, 39 (3): e2019TC005702.
- SIDDOWAY C S, RICHARDS M, FANNING, C M, et al., 2004. Origin and emplacement of a middle Cretaceous gneiss dome, Fosdick Mountains, West Antarctica [M] //WHITNEY D L, TEYSSIER C, SIDDOWAY C S. Gneiss domes in orogeny. Boulder: Special Papers-Geological Society Of America: 267-294.
- STOREY B C, DALZIEL I W D, 1987. Outline of the structural and tectonic history of the Ellsworth Mountains-Thiel Mountains ridge, West Antarctica [M] //MCKENZIE G D. Gondwana Six: Structure, Tectonics, and Geophysics. Washington, DC: American Geophysical Union, 40: 117-128.
- SUÁREZ M, 1976. Plate-tectonic model for southern Antarctic Peninsula and its relation to southern Andes [J]. Geology, 4 (4): 211-214.
- TORSVIK T H, VAN DER VOO R, PREEDEN U, et al., 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics [J]. Earth-Science Reviews, 114 (3-4): 325-368.

- 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 [J]. Journal of the Geological Society, 157 (6): 1243-1256.
- 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 [J]. Journal of the Geological Society, 159 (2): 113-116.
- VAUGHAN A P M, EAGLES G, FLOWERDEW M J, 2012. 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 [J]. Tectonics, 31 (1). TC1010.
- WATTS D R, 1982. Potassium-argon ages and paleomagnetic results from King George Island, South Shetland Islands [M] // CRADDOCK C. Antarctic Geoscience. Madison: University of Wisconsin Press: 255-261.
- WATTS D R, WATTS G C, BRAMALL A M, 1984. Cretaceous and Early Tertiary paleomagnetic results from the Antarctic Peninsula [J]. Tectonics, 3 (3): 333-346.
- WEAVER S D, STOREY B C, PANKHURST R J, et al., 1994. Antarctica-New Zealand rifting and Marie Byrd Land lithospheric magmatism linked to ridge subduction and mantle plume activity [J]. Geology, 22 (9): 811-814.
- WHITE C M, CRADDOCK C, 1987. Compositions of igneous rocks in the Thurston Island area, Antarctica: evidence for a late Paleozoicmiddle Mesozoic Andinotype continental margin [J]. The Journal of Geology, 95 (5): 699-709.
- WILLAN R C R, 2003. Provenance of Triassic-Cretaceous sandstones in the Antarctic Peninsula: implications for terrane models during Gondwana breakup [J]. Journal of Sedimentary Research, 73

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的 语音介绍及更多文章相关资讯 (6): 1062-1077.

- ZHAO Y, SONG B, WANG Y, et al., 1992. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica [M] //YOSHIDA
 Y. Recent progress in Antarctic earth science. Tokyo: Terra Sci. Pub. Com.: 155-161.
- ZHAO Y, SONG B, ZHANG Z Q, et al., 1995. Early Paleozoic (Pan African) thermal event of the Larsemann Hills and its neighbours, Prydz Bay, East Antarctica [J]. Science in China (Series B), 38 (1): 74-84.
- ZHENG G G, LIU X C, LIU S W, et al., 2018. Late Mesozoic-early Cenozoic intermediate-acid intrusive rocks from the Gerlache Strait area, Antarctic Peninsula: Zircon U-Pb geochronology, petrogenesis and tectonic implications [J]. Lithos, 312-313: 204-222.

附中文参考文献

- 陈廷愚, 沈炎彬, 赵越, 等, 2008. 南极洲地质发展与冈瓦纳古陆 演化 [M]. 北京: 商务印书馆.
- 冯宁生,金庆民,王力波,等,1989. 菲尔德斯半岛南部新生界火 山岩系古地磁及地质意义 [J]. 中国地质科学院南京地质矿产研 究所所刊,10 (2):15-25.
- 李三忠, 曹现志, 王光增, 等, 2019. 太平洋板块中—新生代构造 演化及板块重建 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 642-677.
- 李兆鼐,郑祥身,刘小汉,等,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.
- 刘椿,朱日祥,郑祥身,等,1991. 西南极菲尔德斯半岛白垩纪晚 期和第三纪早期岩石的古地磁学及其大地构造意义 [J]. 南极研 究,3 (2):136-143.
- 刘晓春,2018. 高级变质地体中多期变质事件的甄别: 以东南极埃 默里地区为例 [J]. 岩石学报,34 (4):925-939.
- 刘小汉,郑祥身,1988. 西南极乔治王岛菲尔德斯半岛火山岩地质 初步研究 [J]. 南极研究,1 (1):25-35.
- 赵越, 宋彪, 张宗清, 等, 1993. 东南极拉斯曼丘陵及其邻区的泛 非热事件 [J]. 中国科学 (B辑), 23 (9): 1001-1008.

