

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.057

文章编号: 1006-6616 (2021) 05-0691-14

东南极古陆核的研究现状、问题与设想

刘晓春^{1,2,3}, 赵 越^{1,2,3}, 王 伟^{1,2,3}, 陈龙耀^{1,2,3}, 郑光高^{1,2,3}, 刘 健^{1,2,3},
王亚飞⁴, 任留东⁴
LIU Xiaochun^{1,2,3}, ZHAO Yue^{1,2,3}, WANG Wei^{1,2,3}, CHEN Longyao^{1,2,3}, ZHENG Guanggao^{1,2,3}, LIU Jian^{1,2,3},
WANG Yafei⁴, REN Liudong⁴

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
 2. 中国地质调查局极地地质研究中心, 北京 100081;
 3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
 4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Research Center for Polar Geosciences, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

LIU X C, ZHAO Y, WANG W, et al., 2021. Ancient cratonic nuclei in East Antarctica: Research status, problems and prospects [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (5): 691-704. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.057

Abstract: The Archean cratonic nuclei in the East Antarctic Shield (Craton) occur mainly in the Napier Mountains, southern Prince Charles Mountains, Rauer Group and Vestfold Hills in the Indian Ocean sector, and are sporadically exposed in the Australian, African and Pacific sectors. These ancient nuclei with diverse earlier crustal histories and later reworking processes are separated by the Paleoproterozoic-Early Paleozoic (Pan-African-aged) orogens. The nuclei in different sectors have a close affinity with the adjacent Gondwana continental blocks. Integrated bedrock and subglacial geological investigations and petrological and chemical studies will ascertain the temporal and spatial distributions, petrogenesis, source regions, tectonic affinities and multiple metamorphic records of the Archean rocks (materials) in East Antarctica. This can help to reveal the major history from nucleation to assembly of the East Antarctica continent, and thus to contribute to a better understanding of the early history of the Earth from an Antarctic perspective.

Key words: Archean cratonic nuclei; diversity; affinity; East Antarctica; Gondwana

摘 要: 东南极地盾 (克拉通) 中的太古宙陆核主要分布在面向印度洋扇区的内皮尔山、南查尔斯王子山、赖于尔群岛和西福尔丘陵, 在面向澳大利亚、非洲和太平洋扇区只零星出露。这些古陆核被早元古代—早古生代 (泛非期) 造山带所分割, 它们具有不同的早期演化历史和后期改造过程, 并且产于不同扇区的陆核与相邻冈瓦纳陆块具有密切的亲缘关系。对东南极古陆核开展系统的冰上和冰下地质调查以及岩石地球化学综合研究, 查明太古宙岩石 (物质) 的时空分布、岩石成因、源区性质、构造属性及其变质改造历史, 进而构建东南极古大陆从初始成核到最终聚陆的历史框架, 这将弥补地球早期演化研究

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41941004)

This research is financially supported by the National Natural Sciences Foundation of China (Grant No. 41941004)

第一作者简介: 刘晓春 (1962—), 男, 研究员, 从事岩石学研究。E-mail: liuxchqw@cags.ac.cn; liuxchqw@sina.com

收稿日期: 2021-07-09; **修回日期:** 2021-08-28; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 刘晓春, 赵越, 王伟, 等, 2021. 东南极古陆核的研究现状、问题与设想 [J]. *地质力学学报*, 27 (5): 691-704. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.057

领域的南极短板,同时也必将促进地球早期演化研究领域的发展。

关键词: 太古宙陆核; 多样性; 亲缘性; 东南极; 冈瓦纳

中图分类号: P728.2; P313.2 **文献标识码:** A

0 引言

地球的形成与早期演化是固体地球科学研究领域的基础和前沿课题。自冥古宙至太古宙的地球早期历史长达~21 亿年,占据整个地球演化史的近一半。遗憾的是,由于后期漫长的改造与破坏(如晚期大撞击事件,板块构造引起的俯冲、剥蚀等),地球早期形成的地质记录保存相对较少,特别是冥古宙到古太古代的岩石更鲜有保存。事实上,这一重要地球演化阶段涉及大陆地壳的起源和演化(沈其韩等,2016; Hoffmann and Kröner, 2019)、地球早期的构造体制与板块构造的起始(翟明国,2012; Cawood et al., 2018)、地球早期环境演变及成矿(Frei and Polat, 2007; 张连昌等,2012; Byerly et al., 2019; Philippot et al., 2019)等地球科学的重大前沿科学问题,这些问题对于认识地球如何从形成时的高温熔融状态转变为今天的宜居星球至关重要。

现今对地球早期演化历史的认识主要来自于几个古老岩石较发育的古陆核,如格陵兰、加拿大、南非、澳大利亚以及中国华北等地。东南极地盾是地球上最大、最古老的克拉通之一,也是世界上少数几个保存有地球早期(始太古代—古太古代)岩石记录的地区之一,部分岩石中还存在冥古宙锆石(Harley et al., 2019)。与世界上其他地区的古陆核一样,东南极古陆核也保留了多期岩浆和变质事件的记录,发育大规模的 TTG 片麻岩,产出古老的变质壳岩和条带状铁建造(BIF),这为研究地球早期地壳的形成与演化提供了非常难得的对象。然而,与其他地区相比,对东南极太古宙陆核/地体的研究程度还很低,对地球早期演化研究领域的贡献有限,亟待开展深入的研究工作。文章简要介绍了东南极古陆核的分布和研究现状,对古陆核研究中存在的主要问题进行了详细的分析和讨论,并提出了下一步研究工作的设想。

1 东南极古陆核的分布及研究现状

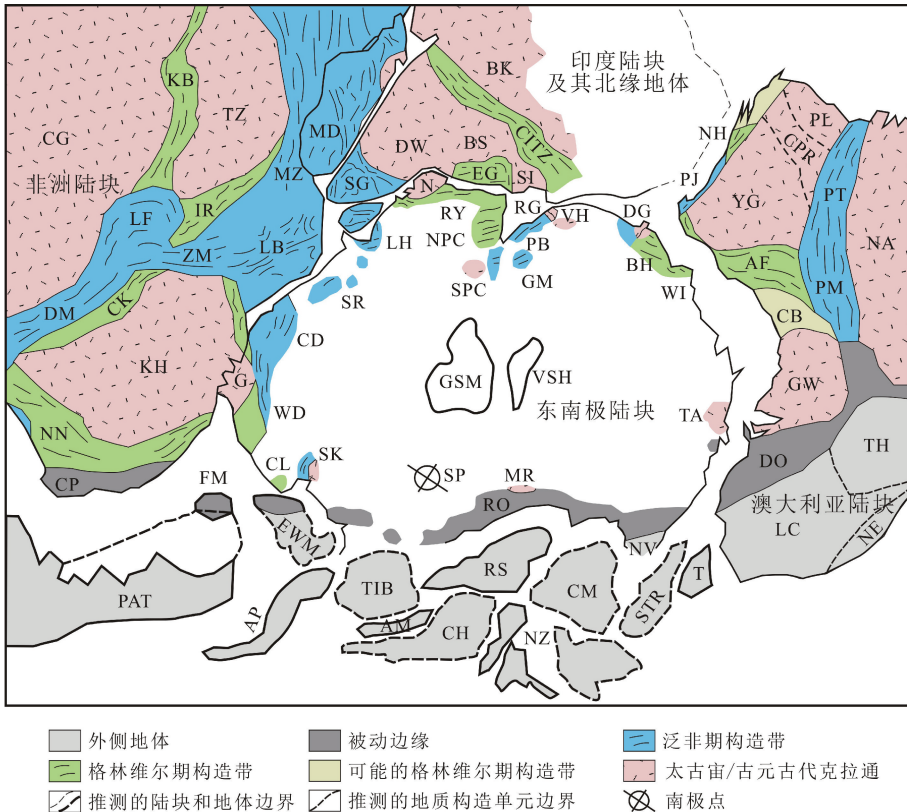
太古宙陆核在东南极地盾(克拉通)中的分

布比较广泛(图1),主要集中出露在面向印度洋扇区的内皮尔山(Napier Mountains)、南查尔斯王子山(Southern Prince Charles Mountains)以及普里兹湾东部的赖于尔群岛(Rauer Group)和西福尔丘陵(Vestfold Hills),其中在西福尔丘陵东南侧推测还存在一个古太古代的冰下陆块(Zhao et al., 2007, 2019; 刘健等,2011)。此外,在其他地区也有零星的太古宙岩石(物质)出露,包括面向非洲扇区的格吕讷霍格纳群峰(Grunehogna Peaks)、面向澳大利亚扇区的登曼冰川(Denman Glacier)-邦杰丘陵(Bunger Hills)和阿黛利地(Terre Adélie)以及面向太平洋扇区的沙克尔顿岭(Shackleton Range)和米勒岭(Miller Range)等。以下对东南极古陆核的研究现状进行简要介绍,其中主要古陆核的地质事件演化序列总结见图2。

1.1 面向印度洋扇区的古陆核

1.1.1 内皮尔山

位于恩德比地(Enderby Land)北侧内皮尔山的内皮尔杂岩出露有南极洲最古老的岩石,也是地球上最古老的岩石之一。现阶段已被证实的内皮尔杂岩中最古老的岩石是松斯山(Mount Sones)和盖奇山脊(Gage Ridge)的正片麻岩,其侵位时代为始太古代(3.85~3.84 Ga),并在其内发现了冥古宙-太古宙早期(4.12~3.89 Ga)具岩浆结构的继承锆石(Black et al., 1986; Harley and Black, 1997; Kelly and Harley, 2005)。此外,内皮尔杂岩中还出露各种古太古代—新太古代的岩石,如:①盖奇山脊和阿克勒群峰(Aker Peaks)的3.65~3.60 Ga 英云闪长质和紫苏花岗质片麻岩(Belyatsky et al., 2011; Kusiak et al., 2013a, 2013b);②里瑟-拉森山(Mount Riiser-Larsen)和托纳岛(Tonagh Island)的3.28~3.23 Ga 正片麻岩(Hokada et al., 2003);③普罗克勒梅申岛(Proclamation Island)、达尔维茨冰原岛峰(Dallwitz Nunatak)和里瑟-拉森山的~3.0 Ga 正片麻岩(Harley and Black, 1997; Kelly and Harley, 2005);④达尔维茨冰原岛峰主体的2.8 Ga 英云闪长质片麻岩(Harley and Black, 1997; Kelly and Harley, 2005);⑤托纳岛的2.74~2.62 Ga 正片麻岩(Carson



AF—奥尔巴尼-弗雷泽造山带; AM—阿蒙森省; AP—南极半岛; BH—邦杰丘陵; BK—本德尔坎德克拉通; BS—巴斯塔克拉通; CB—Coompana 地块; CD—中毛德王后地; CG—刚果克拉通; CH—查塔姆隆起; CITZ—中印度构造带; CK—霍马-卡洛莫地块; CL—科茨地; CM—坎贝尔高原; CP—凯普褶皱带; CPR—Capricorn 造山带; DG—登曼冰川; DM—达马拉造山带; DO—Delamerian 造山带; DW—达尔瓦拉克拉通; EG—东高止带; EWM—埃尔斯沃斯-惠特莫尔地块; FM—福克兰-马尔维纳斯高原; G—格吕讷霍格纳克拉通; GM—格罗夫山; GSM—甘布尔采夫冰下山脉; GW—高勒尔克拉通; IR—伊鲁米德造山带; KH—卡拉哈里克拉通; KB—基巴尔安造山带; LB—卢里奥带; LF—卢弗里安弧; LH—吕措-霍尔姆湾; LC—拉克兰造山带; MD—马达加斯加; MR—米勒岭; MZ—莫桑比克造山带; N—内皮尔杂岩; NA—北澳大利亚克拉通; NE—新西兰造山带; NH—北安普顿杂岩; NN—纳马夸-纳塔尔造山带; NPC—北查尔斯王子山; NV—北维多利亚地地体; NZ—新西兰; PAT—巴塔哥尼亚; PB—普里兹湾; PJ—平贾拉造山带; PL—皮尔巴拉克拉通; PM—皮特曼造山带; PT—帕特森造山带; RG—赖于尔群岛; RO—罗斯造山带; RS—罗斯省; RY—雷纳杂岩; SG—南部麻粒岩地体; SI—辛格布姆克拉通; SK—沙克尔顿岭; SP—南极点; SPC—南查尔斯王子山; SR—南龙达讷山; STR—南塔斯曼隆起; T—塔斯马尼亚; TA—阿黛利地; TH—汤姆森造山带; TIB—瑟斯顿岛地块; TZ—坦桑尼亚克拉通; VH—西福尔丘陵; VSH—东方冰下高地; WD—西毛德王后地; WI—温德米尔群岛; YG—伊尔岗克拉通; ZM—赞比西造山带

图 1 东南极与冈瓦纳相邻陆块在 ~500 Ma 的重建简图 (据 Harley et al., 2013 修改)

Fig. 1 Simplified map showing the reconstruction of Antarctica and adjacent areas of Gondwana at ~500 Ma (modified after Harley et al., 2013)

AF—Albany-Fraser Orogen; AM—Amundsen Province; AP—Antarctic Peninsula; BH—Bunger Hills; BK—Bundelkhand Craton; BS—Bastar Craton; CB—Coompana Block; CD—central Dronning Maud Land; CG—Congo Craton; CH—Chatham Rise; CITZ—central Indian Tectonic Zone; CK—Choma-Kalomo Block; CL—Coats Land; CM—Campbell Plateau; CP—Cape Fold Belt; CPR—Capricorn Orogen; DG—Denman Glacier; DM—Damara Orogen; DO—Delamerian Orogen; DW—Dharwar Craton; EG—Eastern Ghats Belt; EWM—Ellsworth-Whitmore Mountains Block; FM—Falkland-Malvinas Plateau; G—Grunehogna Craton; GM—Grove Mountains; GSM—Gamburtsev Subglacial Mountains; GW—Gawler Craton; IR—Irumide Orogen; KH—Kalahari Craton; KB—Kibaran Orogen; LB—Lurio Belt; LF—Lufilian Arc; LH—Lützow-Holm Complex; LC—Lachlan Orogen; MD—Madagascar; MR—Miller Range; MZ—Mozambique Orogen; N—Napier Complex; NA—North Australian Craton; NE—New England Orogen; NH—Northampton Complex; NN—Namaqua-Natal Orogen; NPC—northern Prince Charles Mountains; NV—northern Victoria Land terranes; NZ—New Zealand; PAT—Patagonia; PB—Prydz Bay; PJ—Pinjarra Orogen; PL—Pilbara Craton; PM—Petermann Orogen; PT—Paterson Orogen; RG—Rauer Group; RO—Ross Orogen; RS—Ross Province; RY—Rayner Complex; SG—Southern Granulite Terrane; SI—Singhbhum Craton; SK—Shackleton Range; SP—South Pole; SPC—southern Prince Charles Mountains; SR—Sør Rondane Mountains; STR—South Tasman Rise; T—Tasmania; TA—Terre Adélie; TH—Thomson Orogen; TIB—Thurston Island Block; TZ—Tanzania Craton; VH—Vestfold Hills; VSH—Vostok Subglacial Highlands; WD—western Dronning Maud Land; WI—Windmill Islands; YG—Yilgarn Craton; ZM—Zambezi Orogen

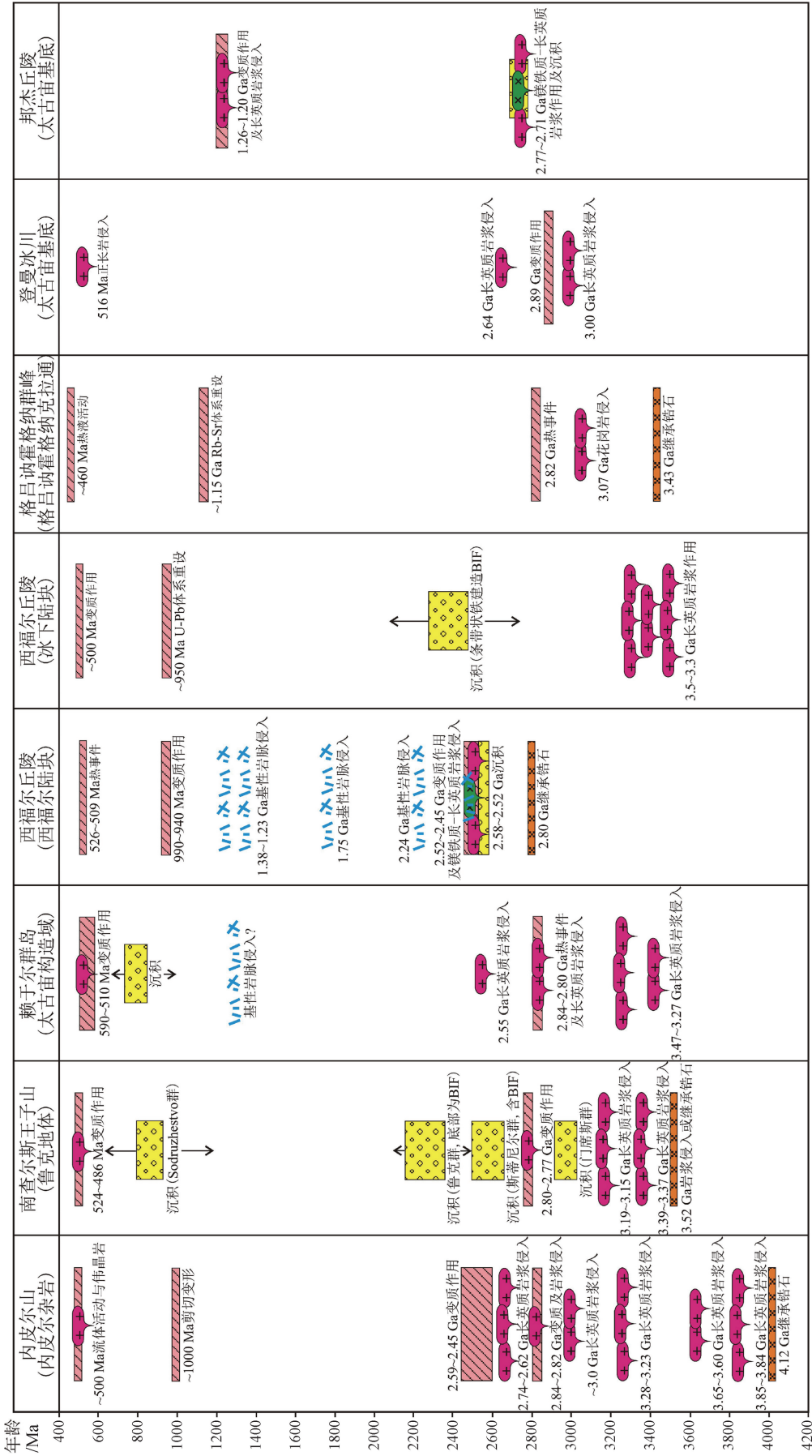


图2 东南极主要古陆核的地质事件时空演化图解

Fig.2 Temporal and spatial diagram showing geological events in ancient cratonic nuclei in East Antarctica

et al., 2002a, 2002b; Crowe et al., 2002; Horie et al., 2012)。内皮尔杂岩主体经历了 2.84~2.82 Ga 的高温/低压变质作用,并在 2.59~2.45 Ga 遭受到区域超高温(UHT)变质作用的改造(Grew and Manton, 1979; James and Black, 1981; Black et al., 1983a; Kelly and Harley, 2005; Harley, 2016; Mitchell and Harley, 2017),格林维尔期(~1000 Ma)有角闪岩相剪切带形成(Sandiford, 1985),泛非期(~500 Ma)的角闪岩相流体渗透导致了岩石的局部退变及伟晶岩侵入(Carson et al., 2002b)。与此不同的是,在东部肯普地(Kemp Land)厄于加伦群岛(Oygarden Group)中的内皮尔杂岩则经历了 1650~1600 Ma 热事件和 930~900 Ma 麻粒岩相变质作用的强烈改造(Kelly et al., 2002, 2004)。

1.1.2 南查尔斯王子山

南查尔斯王子山南侧的鲁克地体(Ruker Terrane)是东南极内陆基岩集中出露区域的典型代表之一。鲁克地体主要由太古宙正片麻岩组成,上覆不同时代的变质沉积岩系。主要的太古宙岩石是 3.39~3.37 Ga 的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩、3.19~3.15 Ga 的花岗质片麻岩(Mawson Orthogneiss Suite)以及分别在 3.15 Ga 和 2.8 Ga 之后沉积的变质表壳岩(Tingey, 1982, 1991; Boger et al., 2001, 2006; Mikhalsky et al., 2001, 2006a, 2006b, 2010; Phillips et al., 2006; Flowerdraw et al., 2013)。这些正片麻岩的 Nd 模式年龄达 3.8~3.2 Ga, 暗示可能有更加古老物质的存在。Boger et al. (2008)在莫森陡崖(Mawson Escarpment)中部的曼宁冰川(Manning Glacier)附近发现了具有高 Sr/Y 比值的偏铝质 TTG 片麻岩,其侵位时代为 3.52 Ga。然而,由于岩石中还含有个别新太古代和泛非期的锆石,所以对这一年龄结果的解释仍存争议(Corvino et al., 2011)。鲁克地体经历了 2.8~2.77 Ga 绿片岩相-角闪岩相变质和变形作用(Boger et al., 2001, 2006)以及泛非期低角闪岩相变质作用的改造(Phillips et al., 2007a, 2007b)。值得指出的是,在南查尔斯王子山的鲁克山(Mount Ruker)和斯蒂尼尔山(Mount Stinear)产出有新太古代-古元古代早期的条带状磁铁矿层(或称碧玉岩,即 BIF),属于苏必利尔湖型和阿尔戈马型铁建造之间的过渡类型(Mikhalsky et al., 2001)。已有资料表明, BIF 层出露厚度~70 m, 矿石平均含铁品位为 33.5%,

最富可达 58%, 整个岩系厚度达 400 m, 航磁异常长达 120~180 km, 宽 5~10 km, 被认为是世界最大铁矿(Ravich et al., 1982; Tingey, 1990; Mikhalsky et al., 2001),但其产出背景、成因以及真实的储量仍然需要做进一步的调查和研究。

1.1.3 赖于尔群岛

赖于尔群岛是一个太古宙-中元古代复合高级变质地体,包含太古宙英云闪长质片麻岩和中元古代镁铁质-长英质侵入体,间夹少量表壳副片麻岩和基性岩脉(基性麻粒岩)。太古宙岩石主要出露在马瑟半岛(Mather Peninsula)、肖特角(Short Point)、谢尔比尼纳岛(Scherbinina Island)和托克勒岛(Torckler Island)等,主要由 3.47~3.27 Ga 和 2.84~2.80 Ga 两个时期的 TTG 片麻岩以及少量的 2.55 Ga 的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩所构成(Sheraton et al., 1984; Kinny et al., 1993; Harley et al., 1995, 1998; Hokada et al., 2016; Harley et al., 2019)。3.47~3.27 Ga TTG 片麻岩的 Nd 模式年龄为 3.8 Ga, 2.85~2.80 Ga TTG 片麻岩的 Nd 模式年龄为 3.5 Ga (Sheraton et al., 1984; Kinny et al., 1993; Harley et al., 1998)。同时, 2.85~2.80 Ga 和 2.55 Ga 的 TTG 片麻岩中含有大量的 3.50~3.25 Ga 的继承岩浆锆石(Kinny et al., 1993; Harley et al., 1998; Harley et al., 2019)。在古太古代岩石中已识别出 2.84~2.80 Ga 热事件,而所有太古宙岩石均经历了泛非期麻粒岩相变质作用的改造,且在局部有超高温(>1000 °C)变泥质岩的报道(Harley and Fitzsimons, 1991; Harley, 1998; Kelsey et al., 2003; Tong and Wilson, 2006; Hokada et al., 2016; Liu et al., 2021)。

1.1.4 西福尔丘陵(西福尔陆块)

西福尔丘陵是一个独特的新太古代/古元古代克拉通陆块,位于赖于尔群岛东北 15 km 处,但与赖于尔群岛的岩石组成明显不同。新的大地电磁调查推测二者之间存在一条古缝合线,但其时代无法准确推断(Peacock and Selway, 2016)。西福尔丘陵的岩石主要由 2.52~2.48 Ga 英云闪长质片麻岩和新太古代变质表壳岩所组成(Oliver et al., 1982; Black et al., 1991; Snape et al., 1997; Clark et al., 2012)。2.52~2.48 Ga 英云闪长质片麻岩中含有 2.80 Ga 的岩浆成因继承锆石和 3.05 Ga 的 Nd 模式年龄(Black et al., 1991; Kinny et al., 1993)。新太古代变质表壳岩的沉积作用发生在 2.58~2.52 Ga,

其主要年龄峰值为 2.75~2.60 Ga, 且含有 3.3~3.1 Ga 的碎屑锆石和 5 颗年龄>3.7 Ga 的锆石 (Clark et al., 2012)。西福尔丘陵新太古代/古元古代地壳普遍经历了 2.50~2.45 Ga 高角闪岩相-麻粒岩相变质作用 (Zulbati and Harley, 2007; Clark et al., 2012)。基于地质事件对比, Clark et al. (2012) 提出西福尔陆块来自于华北克拉通的边缘, 在新太古代/古元古代时期与印度古陆核碰撞对接, 而后随着印度与东南极的汇聚-分离而遗留在南极大陆之上。西福尔丘陵的另一个重要特征是在古元古代-中元古代 (2.47~1.23 Ga) 有大量的, 不同时期的基性岩墙群侵入 (Lanyon et al., 1993; Seitz, 1994), 并经历了格林维尔期 (~960~940 Ma) 麻粒岩相变质作用的改造以及泛非期构造热事件的影响 (Liu et al., 2014)。

1.1.5 西福尔丘陵 (冰下陆块)

西福尔丘陵东南侧古太古代冰下陆块是近年在进行冰下地质调查过程中新发现的一个独特的古太古代陆块 (Zhao et al., 2007, 2019; 刘健等, 2011)。西福尔丘陵东南部存在一条断续延伸~20 km、宽~0.3~0.7 km 的冰碛石带, 主要由 TTG 片麻岩、基性岩、石英岩、浅变质火山岩 (片岩类)、沉积岩 (砂岩类) 等砾石和松散沙组成, 具有混杂堆积、分选差的特征。根据冰川流动方向等资料, 以及碎石带中砾石组成和周围冰川漂砾构成情况, 推测这些冰碛物是从西福尔丘陵东南侧冰川下面搬运而来。初步的锆石 U-Pb 定年表明, TTG 片麻岩和浅变质火山岩砾石样品中的锆石 U-Pb 上交点年龄主要集中在~3.5~3.3 Ga, 下交点年龄或为~950 Ma, 或为~500 Ma; 沉积岩砾石样品中碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中在~2.5 Ga; 冰碛物松散沙样品的碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄主要集中在~3.5~3.3 Ga、2.5~2.4 Ga、~900~800 Ma 和~600~500 Ma。这些年龄信息一方面说明西福尔陆块的分布范围可能远比目前所出露的广阔, 另一方面暗示在西福尔丘陵东南侧的冰盖之下可能存在一个从前未知的, 年龄可达~3.5~3.3 Ga 的冰下陆块, 该陆块只遭受到绿片岩相变质作用的改造。不仅如此, 在冰碛物中还发现了大量的条带状铁建造 (BIF) 样品, 说明该古老陆块也是潜在的铁矿赋存区。

1.2 面向其他扇区的古陆核

1.2.1 格吕讷霍格纳群峰

在毛德王后地 (Dronning Maud Land) 格吕讷霍

格纳群峰中的安南达格斯群峰 (Annandagstoppane) 出露一个中太古代 S 型淡色花岗岩体, 并由此厘定出一个与非洲卡拉哈里 (Kalahari) 克拉通相对应的格吕讷霍格纳克拉通。以前使用矿物-全岩 Rb-Sr 法和全岩 Pb-Pb 法定年获得花岗岩的侵位年龄为~3.0 Ga, 并经历了~2.82 Ga 热事件的叠加 (Barton et al., 1987)。后经锆石 U-Pb 定年获得 3067 ± 8 Ma 的精确年龄, 并含有 3433 ± 7 Ma 的继承锆石 (Marschall et al., 2010)。全岩地球化学和锆石 Hf-O 同位素研究表明花岗岩源于表壳沉积岩的部分熔融, 而 Hf 同位素示踪进一步表明其来自于~3.90 Ga、~3.75 Ga 和~3.50 Ga 等三个始太古代-古太古代壳源层 (Marschall et al., 2010)。此外, 该花岗岩的 Rb-Sr 同位素体系在~1.15 Ga 被重设, 并在~460 Ma 受到热液活动的影响 (Barton et al., 1987)。

1.2.2 登曼冰川和邦杰丘陵

登曼冰川最古老的岩石出露在沙尔科角 (Cape Charcot), 那里英云闪长质片麻岩的形成年龄为 3.00 Ga, 并经历了 2.89 Ga 麻粒岩相变质作用的改造, 在 516 ± 7 Ma 有正长岩侵入 (Black et al., 1992)。此外, 在奥布鲁切夫丘陵 (Obruchev Hills) 也有 2.64 Ga 英云闪长质片麻岩的报道 (Sheraton et al., 1992)。最近, 在邦杰丘陵东南部露岩区也识别出新太古代基底岩石, 主要由镁铁质-长英质正片麻岩和副片麻岩构成, 其原岩年龄集中在 2.77~2.71 Ga, 新太古代锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 +5.80, 与原始地幔值相似, 初始 Hf 同位素比值 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -5 至 +8, 表明也受到陆壳物质的影响 (Tucker et al., 2017)。该新太古代基底在 1.26~1.20 Ga 被英云闪长质-花岗质岩浆侵入, 并在同期 (1.25~1.20 Ga) 经历了麻粒岩相变质作用 (Tucker et al., 2017)。

1.2.3 阿黛利地、米勒岭和沙克尔顿岭

阿黛利地太古宙岩石主要有 3.15~3.05 Ga 的片麻岩残留 (?) 和 2.56~2.45 Ga 的表壳岩系, 二者在 2.44 Ga 遭受变质, 并在 1.71~1.69 Ga 经历了绿片岩-角闪岩相变质作用的改造 (Peucat et al., 1999; Ménot et al., 2005)。在米勒岭的尼姆洛德群 (Nimrod Group), 初始地壳由 3.15~3.0 Ga 的岩浆作用产生, 地壳固结和变质作用发生在 2.96~2.90 Ga, 而后遭受到~2.50 Ga、1.73~1.72 Ga 和 540~515 Ma 三次造山作用的改造 (Goodge

and Fanning, 2002)。沙克尔顿岭含有一个被泛非期构造热事件强烈改造的古元古代地质体,其内可见 2.85 Ga 的碎屑锆石 (Will et al., 2009)。实际上,在这三个地区报道的太古宙年龄大多来自于碎屑或继承锆石,这里是否有真正的太古宙岩石(特别是火成岩石)并不是十分明确。

2 东南极古陆核研究中存在的主要问题

2.1 太古宙岩石分布、规模及相互关系确定的困难性

南极大陆的 98% 终年被冰雪覆盖,基岩出露面积仅占 2%,且缺乏连续性。东南极地盾太古宙岩石虽然分布广泛,但由于出露有限和野外考察的困难,现阶段发现和确定的太古宙岩石均比较零星,对一个地区太古宙岩石的分布特征难以形成总体上的认识。另一方面,也是因为露头的不连续性,在南极大陆很难观察到不同地质体之间的界限,而地质体的划分几乎都是依靠同位素年龄来推断,这给太古宙岩石的识别及与其他地质体关系的确定带来很大困难。例如,内皮尔杂岩是南极大陆太古宙岩石发现最早、最多和研究程度最高的地区,且太古宙各个时期的岩石均有出露,然而,各个时期岩石的分布特征及相互间的关系到现在也不十分清楚;赖于尔群岛是一个太古宙—中元古代复合地体,不仅二者界限不清,除已知的几个岛屿外,其他岛屿是否含有太古宙岩石仍然不清楚;最近在西福尔丘陵东南部推测出的古元古代冰下陆块,其与其他地质体的关系更不清楚。实际上,南极未被冰雪覆盖的太古宙岩石只是太古宙地体或陆块的一小部分,其冰下到底达到多大的规模,需要地球物理调查资料的推测和冰岩钻探的验证。遗憾的是,无论是国内还是国外,冰岩钻探工作都处在技术研发阶段,短期内还无法开展,而地球物理调查工作也并非易事。现有的地球物理探测主要集中在航空地球物理方面,全南极洲的重磁异常数据会实时更新 (Scheinert et al., 2016; Golynsky et al., 2018),但区域性针对冰下基岩大比例尺构造单元划分的工作并不多见 (Golynsky et al., 2006a, 2006b),天然地震和大地电磁测量工作也受后勤保障影响开展的不多 (An et al., 2015; Peacock and Selway,

2016)。尽管如此,使用地球物理手段来探测冰下地质构造仍是今后南极固体地球科学研究的重要方向。

2.2 太古宙岩石年龄记录的复杂性和多解性

东南极太古宙岩石以 TTG 片麻岩为主,各个时期的太古宙岩石均遭受了后期不同程度角闪岩相—麻粒岩相甚至是超高温变质作用和强烈变形作用的改造。在这些过程中岩石中的锆石也遭受了 Pb 同位素体系不同程度的重置并经历新的锆石生长,如果这些 TTG 片麻岩本身就来源于古老地壳的熔融,在进行锆石 U-Pb 定年时会发现,岩石中含有不同时期的太古宙锆石,而哪些是继承锆石?哪些是 TTG 岩浆结晶的锆石?哪些是后期改造的锆石?以及如何对这些不同时期的太古宙锆石进行甄别将直接关系到 TTG 侵位时代的确定。以内皮尔杂岩为例,该杂岩中包含不同时期的太古宙岩石,且主体经历了 2.84~2.82 Ga 的高温/低压变质作用和 2.59~2.45 Ga 的区域超高温变质作用的改造,局部地区还遭受到 3.1 Ga 构造热事件的影响;一方面,多期高温热事件的改造使得原岩形成年龄很难精确测定,另一方面,所获得的年龄数据到底代表哪期地质事件的时代(继承、原岩侵位还是变质年龄?)也不好推测,存在多解性。目前在内皮尔杂岩不同地区获得的冥古宙—太古宙的岩浆锆石 U-Pb 年龄数据从 4.12 Ga 延续到 2.62 Ga (Harley et al., 2019),有关这些不同时代岩石的分布规律和早期岩浆演化序列尚未查清。其他含有古太古代岩石的地质体如鲁克地体和赖于尔群岛的情况也大致如此,且如前所述,对鲁克杂岩中最老岩石 (3.52 Ga) 的侵位年龄的认识也存在争议 (Boger et al., 2008; Corvino et al., 2011)。所以,在东南极太古宙陆核中开展精细的年代学工作仍是必要的,该工作的重要前提则是锆石成因研究,这也是构建南极早期地质事件(包括岩浆事件和变质事件)演化序列的基础。

2.3 太古宙岩石地球化学和岩石成因研究的薄弱性

元素地球化学、全岩 Sr-Nd-Pb 同位素和锆石 Hf-O 同位素研究对探讨太古宙岩石成因,乃至揭示地球早期构造体制、壳幔动力学和大陆生长机制等都具有重要的作用。东南极太古宙陆核虽然发现的较早且比较典型(世界上最古老岩石之一),但是主体的研究工作仍集中在古老地壳物质

的识别上,特别是正片麻岩(主要是TTG片麻岩)的地质年代学工作,而对其地球化学特征和岩石成因的研究则涉及的很少。现阶段,对东南极内皮尔杂岩、鲁克地体、赖于尔群岛、西福尔丘陵格和吕讷霍格纳群峰中的太古宙正片麻岩只有少量地球化学数据的报道(Sheraton et al., 1984; Mikhalsky et al., 2001, 2006b; Marschall et al., 2010),除安南达格斯群峰花岗岩外,基本上都未开展系统的岩石成因研究,而针对沉积岩和BIF的专门性研究更是少见(Phillips et al., 2006; Ernst and Bau, 2021)。在全岩Sr-Nd-Pb同位素和锆石Hf-O同位素方面,内皮尔杂岩是太古宙岩石研究程度最高的地区,对始太古代和古太古代正片麻岩进行了少量的全岩Sr-Nd同位素(Black et al., 1983b; McCulloch and Black, 1984; Black and McCulloch, 1987; Belyatsky et al., 2011)和锆石Hf同位素(Choi et al., 2006; Halpin et al., 2005; Hiess and Bennett, 2016)分析,这些工作对探讨最古老岩石(3.85 Ga)的形成时代和地球早期地幔特征提供了重要的制约。相比而言,鲁克地体、赖于尔群岛、西福尔丘陵和邦杰丘陵则只有很零星的Sr-Nd-Pb-Hf同位素数据的报道(Sheraton et al., 1984; Black et al., 1991; Kinny et al., 1993; Harley et al., 1998; Mikhalsky et al., 2006b; Flowerdew et al., 2013; Tucker et al., 2017)。所以,对不同太古宙陆核开展系统的元素和同位素地球化学研究也十分必要,从而为追溯早期大陆的演化、源区性质及构造属性提供制约。

2.4 太古宙地壳后期改造的多期性及聚合时间的争议性

多期构造热事件的改造是南极大陆地质演化的重要特色之一。在所有的古陆核中,除了在邦杰丘陵和西福尔丘陵东南古太古代冰下地块的岩石中没有找到太古宙的变质线索外,在内皮尔杂岩、鲁克地体、赖于尔群岛、格吕讷霍格纳群峰和登曼冰川中的古老岩石均识别出了太古代变质作用或热事件,而且,内皮尔杂岩在新太古代还经历了超高温变质作用(Mitchell and Harley, 2017)。与华北克拉通具有类似演化历史的西福尔陆块也经历了两幕(分别为2520~2495 Ma和2475~2450 Ma)或者一幕延时的(protracted)高级变质作用(Zulbati and Harley, 2007; Clark et al., 2012)。此外,广泛分布于东南极大陆的格林维尔

(~1000~900 Ma)和泛非(~580~500 Ma)两期构造热事件也不同程度地影响到太古宙陆核,其中影响最弱的是内皮尔杂岩的主体,仅有局部角闪岩相流体流动和伟晶岩脉侵入(Carson et al., 2002b),但其东部边缘则遭受到格林维尔期麻粒岩相变质作用的改造(Halpin et al., 2007)。其他地区中,西福尔丘陵东南侧冰下陆块达绿片岩相,鲁克地体达角闪岩相,西福尔丘陵和邦杰丘陵达麻粒岩相,赖于尔群岛达超高温变质相。然而,由于两期构造热事件的普遍性,使人们难以判断岩石的现存矿物组合到底是形成于格林维尔期还是泛非期?这种争议在经历了超高温变质的赖于尔群岛更加突出(Kelsey et al., 2003, 2007; Tong and Wilson, 2006; Wang et al., 2007)。这直接影响到关于南极大陆,乃至整个东冈瓦纳到底是在格林维尔期还是泛非期拼合的长期争论(Liu et al., 2013),并成为东南极研究的最前沿科学问题之一(Harley et al., 2013)。

2.5 东南极太古宙陆核与其他冈瓦纳陆块的亲缘性

东南极地盾太古宙陆核另一个重要特征是,各个陆核记录了不同的地壳演化历史,因此不能将其连接成一个统一的克拉通陆块。即便是在陆核比较集中的面向印度洋扇区,其各个陆块也具有迥异的早期演化历史(Harley, 2003)。根据冈瓦纳古陆的重建模型(图1),一般认为南极大陆边缘靠近哪个大陆,就具有哪个大陆的属性。据此,将面向非洲扇区的格吕讷霍格纳群峰的太古宙花岗岩划归于非洲的卡拉哈里克拉通;将面向澳大利亚扇区的登曼冰川-邦杰丘陵划归伊尔岗(Yilgarn craton)克拉通;阿黛利地划归与高勒尔(Gawler)克拉通相连的莫森(Mawson)克拉通;将面向印度洋扇区的内皮尔杂岩划归于印度的达尔瓦尔(Dharwar)克拉通,赖于尔群岛和西福尔丘陵划归于印度的辛格布姆(Singhbhum)克拉通(Fitzsimons, 2003; Harley, 2003; Boger, 2011; Tucker et al., 2017)。然而,对南极内陆南查尔斯王子山的鲁克地体、沙克尔顿岭和米勒岭的归属并不明确,而对新发现的西福尔丘陵东南侧的古太古代冰下陆块的构造归属尚未开展研究。必须指出,上述推测多来自于同位素年代学数据的对比,除了在面向印度洋扇区开展了Pb同位素示踪(Flowerdew et al., 2013)、在格吕讷霍格纳群峰和

邦杰丘陵开展了少量 Hf-O 同位素示踪 (Marshall et al., 2010; Tucker et al., 2017) 外,尚缺乏岩石地球化学 (特别是同位素) 证据的支持。查明不同太古宙陆核之间的亲缘性不仅是地球早期演化研究的重要内容,同时对不同地质历史时期里超大陆的复原也具有重要的启示。

3 东南极古陆核下一步研究工作设想

东南极地盾的太古宙岩石虽然分布广泛,但其出露零散且基岩露头规模有限。根据前期野外调研基础以及南极现场地质考察的国内保障和国际合作条件,建议我国对东南极古陆核调查和研究的重点主要放在面向印度洋扇区的内皮尔山-查尔斯王子山-普里兹湾地区,研究对象主要包括产出古太古代及更老岩石 (或物质) 的内皮尔杂岩、鲁克地体、赖于尔群岛和西福尔丘陵东南侧的冰下陆块,并以后者为核心,兼顾新太古代/古元古代初期的西福尔丘陵。同时,选择面向非洲扇区的格吕讷霍格纳群峰、面向澳大利亚扇区的登曼冰川-邦杰丘陵、澳大利亚伊尔岗和皮尔巴拉克拉通、印度达尔瓦尔和辛格布姆克拉通、南非卡拉哈里 (即卡普瓦尔) 克拉通以及华北克拉通等古老克拉通陆块开展对比研究,近期的研究工作可聚焦在以下几个方面。

3.1 古太古代及更老岩石 (物质) 的识别、分布及精细年代

(1) 通过航空地球物理调查 (冰雷达、重力和磁法) 获得西福尔丘陵至南查尔斯王子山区域冰下地貌以及冰盖流域体系,查明鲁克地体、赖于尔群岛和西福尔丘陵等太古宙陆块的冰下分布范围及陆块边界,结合基岩和冰碛石代表性岩石样品的物理性质 (磁性、密度、波速和电阻率等) 测定,确定西福尔丘陵东南侧古太古代冰下陆块的位置及规模,为未来可能的基岩钻探提供选址依据。

(2) 对西福尔丘陵东南侧广泛分布的冰碛碎石带开展系统的调查,查明碎石带的物质组成特征,在已获得少量古太古代 TTG、浅变质火山岩和 BIF 的基础上,搜寻和收集所有的古老岩石类型。使用高精度的离子探针 (SHRIMP 或 CAMECA) 测年技术对不同类型的岩石 (包括 TTG 片麻岩、浅变质火山岩及可能的变质沉积岩) 开展精细定

年,寻找更古老 (冥古宙—始太古代) 的岩石或锆石,建立早期岩浆演化的序列。

(3) 对赖于尔群岛、鲁克地体和内皮尔杂岩中的代表性 TTG 片麻岩及变质沉积岩开展系统的锆石 U-Pb 定年,合理解读片麻岩中的继承锆石和岩浆结晶锆石,进而限定原岩的侵位时代。结合部分冰原岛峰或海中岛屿的大比例尺地质填图圈定 >3.2 Ga 岩石的分布范围并查明其与其他中太古代—新太古代岩石的接触关系,继续寻找冥古宙—始太古代古老岩石或锆石,建立南极大陆太古宙 (~3.8~2.5 Ga) 地质事件演化序列。

3.2 太古宙岩石的成因、大陆地壳生长和演化

(1) 对西福尔丘陵东南侧冰碛碎石带、赖于尔群岛、鲁克地体和内皮尔杂岩中的古太古代及更老的 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩开展元素和 Nd-Pb-Hf-O 同位素地球化学研究,并对碎石带中的重要样品开展全岩 Hf-W 同位素示踪,揭示古老片麻岩的岩石成因,探索南极大陆早期地壳的起源、性质以及生长和演化过程。

(2) 对赖于尔群岛、内皮尔杂岩和西福尔丘陵中的中太古代—新太古代 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩开展元素和 Nd-Pb-Hf-O 同位素地球化学研究,揭示中太古代—新太古代 TTG 和花岗质片麻岩的岩石成因及其与古太古代片麻岩的成分差别和演变关系,探索南极大陆太古宙中晚期地壳的性质、生长、演化过程以及可能的构造体制的转变。

(3) 对西福尔丘陵东南侧冰碛碎石带中的变质表壳岩 (浅变质火山岩和沉积岩) 开展元素和同位素地球化学研究,查明表壳岩的源区特征及其对太古宙构造体制的制约。同时,对该冰碛碎石带和鲁克地体中的 BIF 开展元素和 Nd 同位素地球化学研究,揭示两个区域 BIF 的物质来源、成因及其反映的沉积环境,并查明两者是否具有成因联系。

3.3 古陆核新太古代—古元古代变质演化与格林维尔期和泛非期改造

(1) 新太古代—古元古代变质作用主要叠加在内皮尔杂岩和西福尔丘陵太古宙岩石之上。内皮尔杂岩是世界上第一个被确定的超高温 (UHT) 变质地体,也是规模最大的 UHT 地体之一,目前的主要争论在于其 UHT 变质的持续时间,有短期 (~40 Ma) 和长期 (>100 Ma) 两种不同的认识;西福尔丘陵的麻粒岩相变质时间大致在 2.52~2.45 Ga

之间,也有两幕和一幕变质以及高温和超高温变质之争。所以,对两个地体变质时代和变质 $P-T$ 演化均有进一步研究的必要,二者新太古代—古元古代变质时间的近于一致性是否说明它们在这一时期已汇聚在一起?也值得进一步探究。

(2) 初步研究结果表明,格林维尔期构造热事件在各个古陆核上的叠加与否及叠加程度(行为)是不相同的,在西福尔丘陵达到麻粒岩相,在内皮尔杂岩东缘也达到麻粒岩相,而其内部则为角闪岩相且具有局部的性质,在西福尔丘陵东南侧冰下陆块仅表现为锆石的 Pb 同位素丢失,鲁克地体没有发现叠加的痕迹,而赖于尔群岛的 UHT 变质尚有格林维尔期和泛非期之争。所以,查明格林维尔期变质叠加改造的时代、变质行为及 $P-T$ 演化将有助于对格林维尔期造山作用的性质及其对南极大陆汇聚过程的理解。

(3) 泛非期构造热事件也叠加在所有古陆核之上,现研究的重点应放在赖于尔群岛、西福尔丘陵和西福尔丘陵东南侧的冰下陆块。在赖于尔群岛,可以重点研究变质反应结构非常发育的石榴二辉麻粒岩是否也经历了 UHT 变质作用,UHT 变质的时代到底是格林维尔期还是泛非期?在西福尔丘陵,可以重点查明泛非期构造热事件的温度到底有多高?是否引起了新矿物的生长,还是只表现为部分同位素体系(如 Sm-Nd 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)的重设?在冰下陆块,主要查明绿片岩相作用的时代和 $P-T$ 条件。以此为基础,来探索南极大陆(乃至整个东冈瓦纳)的汇聚时限、过程和机制。

3.4 东南极太古宙陆核之间以及与其他大陆古陆核的亲缘关系

(1) 在建立不同太古宙陆块的地质事件序列、岩石成因和源区性质的基础上,系统对比面向印度洋扇区的内皮尔杂岩、鲁克地体、赖于尔群岛、西福尔丘陵、西福尔丘陵东南侧冰下陆块以及面向非洲扇区的格吕讷霍格纳群峰和面向澳大利亚扇区的登曼冰川—邦杰丘陵的相似性和差别,揭示它们之间近缘、远缘或无缘的关系,探索地球早期陆核的形成过程。

(2) 开展南极太古宙古陆核与南半球冈瓦纳其他陆核的对比研究,并特别注重西福尔丘陵东南侧冰下陆块和鲁克地体与澳大利亚皮尔巴拉克拉通的对比,内皮尔杂岩、赖于尔群岛和西福尔丘陵与印度达尔瓦尔和辛格布姆克拉通的对比,

以及格吕讷霍格纳群峰与非洲卡拉哈里克拉通的对比,登曼冰川—邦杰丘陵与伊尔岗克拉通的对比,探索它们之间的亲缘关系,为南极大地构造分区及最终聚陆过程提供地质依据。

(3) 开展西福尔丘陵与华北克拉通新太古代—古元古代沉积、岩浆和变质事件的对比研究,对二者是否具有同源演化关系作出明确的回答。如果二者在新太古代—古元古代确曾连在一起,那么它们又是何时、如何分离的?

(4) 通过国际合作获取北半球格陵兰和加拿大始太古代—古太古代典型样品,对比全球早期大陆地壳的成分特征,探索南极古老陆核对地球早期地壳形成和演化的意义,为未来开展北极地区地球早期历史的研究做准备。

4 结语

东南极地盾是地球上少数几个保存有地球早期(始太古代—古太古代)岩石(锆石)记录的古老克拉通之一,是研究地球早期地壳的形成与演化的重要场所。然而,与其他地区相比,对东南极太古宙陆核(陆块/地体)的研究程度还很低,目前仍停留在 TTG 片麻岩形成年龄的厘定和早期地质记录的寻找阶段,较少涉及到岩石成因、大陆地壳生长、沉积环境演变等方面,对早期变质演化及其反映的构造体制的研究也不多见。东南极古陆核主要出露在面向印度洋扇区的内皮尔—查尔斯王子山—普里兹湾地区,中山站在该区的建立为中国地质学家在此开展工作提供了便利条件。中国的近期目标应通过冰上基岩调查、冰碛物溯源、冰下地球物理探测以及岩石地球化学综合研究,查明面向印度洋扇区太古宙岩石(物质)的时空分布、岩石成因、源区性质、构造属性及其变质改造历史。从长远看,随着后勤保障能力的提高,中国研究的区域将会逐步扩展到其他扇区,并系统开展东南极与其他冈瓦纳乃至北半球陆块中古陆核的对比研究。通过这项研究,将会弥补地球早期演化研究领域的南极短板,同时也必将促进地球早期演化研究领域的发展。

致谢: 南极野外现场考察得到国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心的支持,万渝生研究员和全来喜教授审阅了文章并提出建设性修改意见,在此一并感谢。

References

- AN M J, WIENS D A, ZHAO Y, et al., 2015. S-velocity model and inferred Moho topography beneath the Antarctic Plate from Rayleigh waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (1): 359-383.
- BARTON J M, KLEMD R, ALLSOPP H L, et al., 1987. The geology and geochronology of the Annandagstoppane granite, Western Dronning Maud Land, Antarctica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97 (4): 488-496.
- BELYATSKY B V, RODIONOV N V, ANTONOV A V, et al., 2011. The 3.98~3.63 Ga zircons as indicators of major processes operating in the ancient continental crust of the east Antarctic shield (Enderby Land) [J]. *Doklady Earth Sciences*, 438 (2): 770-774.
- BLACK L P, JAMES P R, HARLEY S L, 1983a. Geochronology and geological evolution of metamorphic rocks in the Field Islands area, East Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1 (4): 277-303.
- BLACK L P, JAMES P R, HARLEY S L, 1983b. The geochronology, structure and metamorphism of early Archaean rocks at Fyfe Hills, Enderby Land, Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 21 (3-4): 197-222.
- BLACK L P, WILLIAMS I S, COMPSTON W, 1986. Four zircon ages from one rock: the history of a 3930 Ma-old granulite from Mount Sones, Enderby Land, Antarctica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94 (4): 427-437.
- BLACK L P, MCCULLOCH M T, 1987. Evidence for isotopic equilibration of Sm-Nd whole-rock systems in early Archaean crust of Enderby Land, Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 82 (1-2): 15-24.
- BLACK L P, KINNY P D, SHERATON J W, et al., 1991. Rapid production and evolution of late Archaean felsic crust in the Vestfold Block of East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 50 (3-4): 283-310.
- BLACK L P, SHERATON J W, TINGEY R J, et al., 1992. New U-Pb zircon ages from the Denman Glacier area, East Antarctica, and their significance for Gondwana reconstruction [J]. *Antarctic Science*, 4 (4): 447-460.
- BOGER S D, WILSON C J L, FANNING C M, 2001. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: the final suture between east and west Gondwana? [J]. *Geology*, 29 (5): 463-466.
- BOGER S D, WILSON C J L, FANNING C M, 2006. An Archaean province in the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica: U-Pb zircon evidence for c. 3170 Ma granite plutonism and c. 2780 Ma partial melting and orogenesis [J]. *Precambrian Research*, 145 (3-4): 207-228.
- BOGER S D, MAAS R, FANNING C M, 2008. Isotopic and geochemical constraints on the age and origin of granitoids from the central Mawson Escarpment, southern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155 (3): 379-400.
- BOGER S D, 2011. Antarctica-before and after Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 19 (2): 335-371.
- BYERLY G R, LOWE D R, HEUBECK C, 2019. Geologic evolution of the Barberton Greenstone Belt-a unique record of crustal development, surface processes, and early life 3.55 ~ 3.20 Ga [M] //VAN KRANENDONK M J, BENNETT V C, HOFFMANN J E. *Earth's Oldest Rocks*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 569-613.
- CARSON C J, AGUE J J, COATH C D, 2002a. U-Pb geochronology from Tonagh Island, East Antarctica: implications for the timing of ultra-high temperature metamorphism of the Napier Complex [J]. *Precambrian Research*, 116 (3-4): 237-263.
- CARSON C J, AGUE J J, GROVE M, et al., 2002b. U-Pb isotopic behaviour of zircon during upper-amphibolite facies fluid infiltration in the Napier Complex, east Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199 (3-4): 287-310.
- CAWOOD P A, HAWKESWORTH C J, PISAREVSKY S A, et al., 2018. Geological archive of the onset of plate tectonics [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376 (2132): 20170405.
- CHOI S H, MUKASA S B, ANDRONIKOV A V, et al., 2006. Lu-Hf systematics of the ultra-high temperature Napier Metamorphic Complex in Antarctica: Evidence for the early Archean differentiation of Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246 (3-4): 305-316.
- CLARK C, KINNY P D, HARLEY S L, 2012. Sedimentary provenance and age of metamorphism of the Vestfold Hills, East Antarctica: evidence for a piece of Chinese Antarctica? [J]. *Precambrian Research*, 196-197: 23-45.
- CORVINO A F, WILSON C J L, BOGER S D, 2011. The structural and tectonic evolution of a Rodinian continental fragment in the Mawson Escarpment, Prince Charles Mountains, Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 184 (1-4): 70-92.
- CROWE W A, OSANAI Y, TOYOSHIMA T, et al., 2002. SHRIMP geochronology of a mylonite zone on Tonagh Island: characterisation of the last high-grade tectonothermal event in the Napier Complex, East Antarctica [J]. *Polar Geoscience*, 15: 17-36.
- ERNST D M, BAU M, 2021. Banded iron formation from Antarctica: The 2.5 Ga old Mt. Ruker BIF and the antiquity of lanthanide tetrad effect and super-chondritic Y/Ho ratio in seawater [J]. *Gondwana Research*, 91: 97-111.
- FITZSIMONS I C W, 2003. Proterozoic basement provinces of southern and southwestern Australia, and their correlation with Antarctica [M] //YOSHIDA M, WINDLEY B, DASGUPTA S. *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup*. Geological Society, London, Special Publications, 206 (1): 93-130.
- FLOWERDEW M J, TYRRELL S, BOGER S D, et al., 2013. Pb isotopic domains from the Indian Ocean sector of Antarctica: implications for past Antarctica-India connections [M] //HARLEY S L, FITZSIMONS I C W, ZHAO Y. *Antarctica and Supercontinent Evolution*. Geological Society, London, Special Publications, 383 (1): 59-72.
- FREI R, POLAT A, 2007. Source heterogeneity for the major

- components of ~3.7 Ga Banded Iron Formations (Isua Greenstone Belt, Western Greenland): Tracing the nature of interacting water masses in BIF formation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 253 (1-2): 266-281.
- GOLYNSKY A V, MASOLOV V N, VOLNUKHIN V S, et al., 2006a. Crustal provinces of the Prince Charles Mountains region and surrounding areas in the light of aeromagnetic data [M] // FÜTTERER D K, DAMASKE D, KLEINSCHMIDT G, et al. *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag: 83-94.
- GOLYNSKY A V, GOLYNSKY D A, MASOLOV V N, et al., 2006b. Magnetic anomalies of the Grove Mountains region and their geological significance [M] // FÜTTERER D K, DAMASKE D, KLEINSCHMIDT G, et al. *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag: 95-105.
- GOLYNSKY A V, FERRACCIOLI F, HONG J K, et al., 2018. New magnetic anomaly map of the Antarctic [J]. *Geophysical Research Letters*, 45 (13): 6437-6449.
- GOODGE J W, FANNING C M, 2002. Precambrian crustal history of the Nimrod Group, central Transantarctic Mountains [M] // GAMBLE J A, SKINNER D N B, HENRYS S. *Antarctica at the Close of a Millennium*. Royal Society of New Zealand Bulletin, 35: 43-50.
- GREW E S, MANTON W I, 1979. Archean rocks in Antarctica: 2.5 billion year uranium-lead ages of pegmatites in Enderby Land [J]. *Science*, 206 (4417): 443-445.
- HALPIN J A, GERAKITEYS C L, CLARKE G L, et al., 2005. In-situ U-Pb geochronology and Hf isotope analyses of the Rayner Complex, east Antarctica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148 (6): 689-706.
- HALPIN J A, WHITE R W, CLARKE G L, et al., 2007. The proterozoic *P-T-t* evolution of the Kemp Land coast, East Antarctica: constraints from Si-saturated and Si-undersaturated Metapelites [J]. *Journal of Petrology*, 48 (7): 1321-1349.
- HARLEY S L, FITZSIMONS I C W, 1991. Pressure-temperature evolution of metapelitic granulites in a polymetamorphic terrane; the Rauer Group, East Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 9 (3): 231-243.
- HARLEY S L, SNAPE I, FITZSIMONS I C W, 1995. Regional correlations and terrane assembly in East Prydz Bay: Evidence from the rauer group and vestfold hills [J]. *Terra Antarctica*, 2: 49-60.
- HARLEY S L, BLACK L P, 1997. A revised Archean chronology for the Napier complex, Enderby Land, from SHRIMP ion-microprobe studies [J]. *Antarctic Science*, 9 (1): 74-91.
- HARLEY S L, 1998. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism [M] // TRELOAR P J, O'BRIEN P. *What Drives Metamorphism and Metamorphic Reactions?* Geological Society, London, Special Publications, 138 (1): 81-107.
- HARLEY S L, SNAPE I, BLACK L P, 1998. The evolution of a layered metaigneous complex in the Rauer Group, East Antarctica: evidence for a distinct Archean terrane [J]. *Precambrian Research*, 89 (3-4): 175-205.
- HARLEY S L, 2003. Archean-Cambrian crustal development of East Antarctica: metamorphic characteristics and tectonic implications [M] // YOSHIDA M, WINDLEY B, DASGUPTA S. *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup*. Geological Society, London, Special Publications, 206 (1): 203-230.
- HARLEY S L, KELLY N M, KUSIAK M A, 2019. Ancient Antarctica: the Archean of the East Antarctic Shield [M] // VAN KRAENENDONK M J, BENNETT V C, HOFFMANN J E. *Earth's Oldest Rocks (Second Edition)*. Elsevier (Amsterdam): 865-897.
- HARLEY S L, FITZSIMONS I C W, ZHAO Y, 2013. Antarctica and supercontinent evolution: historical perspectives, recent advances and unresolved issues [M] // HARLEY S L, FITZSIMONS I C W, ZHAO Y. *Antarctica and Supercontinent Evolution*. Geological Society, London, Special Publications, 283 (1): 1-34.
- HARLEY S L, 2016. A matter of time: the importance of the duration of UHT metamorphism [J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 111 (2): 50-72.
- HIESS J, BENNETT V C, 2016. Chondritic Lu/Hf in the early crust-mantle system as recorded by zircon populations from the oldest Eoarchean rocks of Yilgarn Craton, West Australia and Enderby Land, Antarctica [J]. *Chemical Geology*, 427: 125-143.
- HOFFMANN J E, KRÖNER A, 2019. Early Archean crustal evolution in southern Africa—An updated record of the ancient gneiss complex of Swaziland [M] // VAN KRAENENDONK M J, BENNETT V C, HOFFMANN J E. *Earth's Oldest Rocks*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier: 553-567.
- HOKADA T, MISAWA K, SHIRAIISHI K, et al., 2003. Mid to late Archean (3.3~2.5 Ga) tonalitic crustal formation and high-grade metamorphism at Mt. Riiser-Larsen, Napier Complex, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 127 (1-3): 215-228.
- HOKADA T, HARLEY S L, DUNKLEY D J, et al., 2016. Peak and post-peak development of UHT metamorphism at Mather Peninsula, Rauer Islands: zircon and monazite U-Th-Pb and REE chemistry constraints [J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 111 (2): 89-103.
- HORIE K, HOKADA T, HIROI Y, et al., 2012. Contrasting Archean crustal records in western part of the Napier Complex, East Antarctica: new constraints from SHRIMP geochronology [J]. *Gondwana Research*, 21 (4): 829-837.
- JAMES P R, BLACK L P, 1981. A review of the structural evolution and geochronology of the Archean Napier complex of Enderby land, Australian Antarctic Territory [M] // GLOVER J E, GROVES D I. *Archean Geology*. Geological Society of Australia, Special Publications, 7: 71-83.
- KELLY N M, CLARKE G L, FANNING C M, 2002. A two-stage evolution of the Neoproterozoic Rayner Structural Episode: new U-Pb sensitive high resolution ion microprobe constraints from the Oygarden Group, Kemp Land, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 116 (3-4): 307-330.
- KELLY N M, CLARKE G L, FANNING C M, 2004. Archean crust in the Rayner Complex of East Antarctica: Oygarden Group of islands,

- Kemp Land [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95 (3-4): 491-510.
- KELLY N M, HARLEY S L, 2005. An integrated microtextural and chemical approach to zircon geochronology: refining the Archaean history of the Napier Complex, east Antarctica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149 (1): 57-84.
- KELSEY D E, WHITE R W, POWELL R, et al., 2003. New constraints on metamorphism in the Rauer Group, Prydz Bay, east Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21 (8): 739-759.
- KELSEY D E, HAND M, CLARK C, et al., 2007. On the application of in situ monazite chemical geochronology to constraining P-T-t histories in high-temperature (>850 °C) polymetamorphic granulites from Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Journal of the Geological Society*, 164 (3): 667-683.
- KINNY P D, BLACK L P, SHERATON J W, 1993. Zircon ages and the distribution of Archaean and Proterozoic rocks in the Rauer Islands [J]. *Antarctic Science*, 5 (2): 193-206.
- KUSIAK M A, WHITEHOUSE M J, WILDE S A, et al., 2013a. Mobilization of radiogenic Pb in zircon revealed by ion imaging: implications for early Earth geochronology [J]. *Geology*, 41 (3): 291-294.
- KUSIAK M A, WHITEHOUSE M J, WILDE S A, et al., 2013b. Changes in zircon chemistry during Archean UHT metamorphism in the Napier Complex, Antarctica [J]. *American Journal of Science*, 313 (9): 933-967.
- LANYON R, BLACK L P, SEITZ HM, 1993. U-Pb zircon dating of mafic dykes and its application to the Proterozoic geological history of the Vestfold Hills, East Antarctica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115 (2): 184-203.
- LIU J, ZHAO Y, LIU X C, et al., 2011. LA-ICP-MS U-Pb ages and its significance of detrital zircon come from gravel of sedimentary rock in moraine nearby Vestfold Hills, East Antarctica [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (10): 1585-1612. (in Chinese with English abstract)
- LIU X C, ZHAO Y, HU J M, 2013. The c. 1000~900 Ma and c. 550~500 Ma tectonothermal events in the Prince Charles Mountains-Prydz Bay region, East Antarctica, and their relations to supercontinent evolution [M] // HARLEY S L, FITZSIMONS I C W, ZHAO Y. *Antarctica and Supercontinent Evolution*. Geological Society, London, Special Publications, 283 (1): 95-112.
- LIU X C, WANG W, ZHAO Y, et al., 2014. Early Neoproterozoic granulite facies metamorphism of mafic dykes from the Vestfold Block, east Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32 (9): 1041-1062.
- LIU X C, CHEN L Y, WANG W, et al., 2021. Deciphering early Neoproterozoic and Cambrian high-grade metamorphic events in the Archean/Mesoproterozoic Rauer Group, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, in revision 365: 106392.
- MARSCHALL H R, HAWKESWORTH C J, STOREY C D, et al., 2010. The Annandagstoppane granite, East Antarctica: evidence for Archaean intracrustal recycling in the Kaapvaal-Grünhegna Craton from zircon O and Hf isotopes [J]. *Journal of Petrology*, 51 (11): 2277-2301.
- MCCULLOCH M T, BLACK L P, 1984. Sm-Nd isotopic systematics of Enderby Land granulites and evidence for the redistribution of Sm and Nd during metamorphism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 71 (1): 46-58.
- MÉNOT R P, PÉCHER A, ROLLAND Y, et al., 2005. Structural setting of the Neoproterozoic terrains in the Commonwealth Bay area (143 ~ 145° E), Terre Adélie craton, East Antarctica [J]. *Gondwana Research*, 8: 1-9.
- MIKHALSKY E V, SHERATON J W, LAIBA A A, et al., 2001. Geology of the Prince Charles Mountains, Antarctica [M]. Australian Geological Survey Organisation, Canberra, *Geoscience Australia Bulletin* 247.
- MIKHALSKY E V, BELIATSKY B V, SHERATON J W, et al., 2006a. Two distinct Precambrian terranes in the southern Prince Charles mountains, east Antarctica: SHRIMP dating and geochemical constraints [J]. *Gondwana Research*, 9 (3): 291-309.
- MIKHALSKY E V, LAIBA A A, BELIATSKY B V, 2006b. Tectonic subdivision of the Prince Charles Mountains: a review of geologic and isotopic data [M] // FUTTERER D K, DAMASKE D, KLEINSCHMIDT G, et al. *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer: 69-81.
- MIKHALSKY E V, HENJES-KUNST F, BELYATSKY B V, et al., 2010. New Sm-Nd, Rb-Sr, U-Pb and Hf isotope systematics for the southern Prince Charles Mountains (East Antarctica) and its tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 182 (1-2): 101-123.
- MITCHELL R J, HARLEY S L, 2017. Zr-in-rutile resetting in aluminosilicate bearing ultra-high temperature granulites: Refining the record of cooling and hydration in the Napier Complex, Antarctica [J]. *Lithos*, 272-273: 128-146.
- OLIVER R L, JAMES P R, COLLERSON K D, et al., 1982. Precambrian geologic relationships in the Vestfold Hills, Antarctica [M] // CRADDOCK C. *Antarctic Geoscience*. Madison: University of Wisconsin Press: 435-444.
- PEACOCK J R, SELWAY K, 2016. Magnetotelluric investigation of the vestfold hills and rauer group, east antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (4): 2258-2273.
- PEUCAT J J, MÉNOT R P, MONNIER O, et al., 1999. The Terre Adélie basement in the East-Antarctica Shield: geological and isotopic evidence for a major 1.7 Ga thermal event; comparison with the Gawler Craton in South Australia [J]. *Precambrian Research*, 94 (3-4): 205-224.
- PHILIPPOT P, MULLER E, ROLLION-BARD C, 2019. Origin of paleoproterozoic sulfate deposits [M] // VAN KRANENDONK M J, BENNETT V C, HOFFMANN J E. *Earth's Oldest Rocks*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier: 211-235.
- PHILLIPS G, WILSON C J L, CAMPBELL I H, et al., 2006. U-Th-Pb detrital zircon geochronology from the southern Prince Charles mountains, east Antarctic-defining the Archaean to Neoproterozoic Ruker province [J]. *Precambrian Research*, 148 (3-4): 292-306.
- PHILLIPS G, WILSON C J L, PHILLIPS D, et al., 2007a. Thermochronological (⁴⁰Ar/³⁹Ar) evidence of Early Palaeozoic basin inversion within the southern Prince Charles Mountains, East

- Antarctica: implications for East Gondwana [J]. *Journal of the Geological Society*, 164 (4): 771-784.
- PHILLIPS G, WHITE R W, WILSON C J L, 2007b. On the roles of deformation and fluid during rejuvenation of a polymetamorphic terrane: inferences on the geodynamic evolution of the Ruker Province, East Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25 (8): 855-871.
- RAVICH M G, FEDOROV L V, TARUTIN O A, 1982. Precambrian iron deposits of the Prince Charles Mountains [M] //CRADDOCK C. *Antarctic Geoscience*. Madison: University of Wisconsin Press: 853-858.
- SANDIFORD M, 1985. The origin of retrograde shear zones in the Napier Complex: Implications for the tectonic evolution of Enderby Land, Antarctica [J]. *Journal of Structural Geology*, 7 (3-4): 477-488.
- SCHEINERT M, FERRACCIOLI F, SCHWABE J, et al., 2016. New Antarctic gravity anomaly grid for enhanced geodetic and geophysical studies in Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 43 (2): 600-610.
- SEITZ H M, 1994. Estimation of emplacement pressure for 2350 Ma high-Mg tholeiite dykes, Vestfold Hills, Antarctica [J]. *European Journal of Mineralogy*, 6 (2): 195-208.
- SHEN Q H, GENG Y S, SONG H X, 2016. Progress and problems in the Hadean research of the Globe [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90 (9): 2083-2099. (in Chinese with English abstract)
- SHERATON J W, BLACK L P, MCCULLOCH M T, 1984. Regional geochemical and isotopic characteristics of high-grade metamorphics of the Prydz Bay area: the extent of Proterozoic reworking of Archean continental crust in East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 26 (2): 169-198.
- SHERATON J W, BLACK L P, TINDLE A G, 1992. Petrogenesis of plutonic rocks in a Proterozoic granulite-facies terrane—the Bunger Hills, East Antarctica [J]. *Chemical Geology*, 97 (3-4): 163-198.
- SNAPE I, BLACK L P, HARLEY S L, 1997. Refinement of the timing of magmatism, high-grade metamorphism and deformation in the Vestfold Hills, East Antarctica, from new SHRIMP U-Pb zircon geochronology [M] //RICCI C A. *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*. Siena: Terra Antarctica Publications: 139-148.
- TINGEY R J, 1982. The geologic evolution of the Prince Charles mountains—an Antarctic Archean cratonic block [M] //CRADDOCK C. *Antarctic Geoscience*. Madison: University of Wisconsin Press: 455-464.
- TINGEY R J, 1990. Banded iron formations in east Antarctica [M] //SPLETTSTOESESSER J F. *Mineral Resources Potential of Antarctica*. Washington, DC: American Geophysical Union: 125-131.
- TINGEY R J, 1991. The regional geology of Archean and Proterozoic rocks in Antarctica [M] //TINGEY R J. *The Geology of Antarctica*. Oxford: Clarendon Press: 1-78.
- TONG L X, WILSON C J L, 2006. Tectonothermal evolution of the ultrahigh temperature metapelites in the Rauer Group, east Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 149 (1-2): 1-20.
- TUCKER N M, PAYNE J L, CLARK C, et al., 2017. Proterozoic reworking of Archean (Yilgarn) basement in the Bunger Hills, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 298: 16-38.
- WANG Y B, TONG L X, LIU D Y, 2007. Zircon U-Pb ages from an ultra-high temperature metapelite, Rauer Group, east Antarctica: implications for overprints by Grenvillian and Pan-African events [C] //10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences. U. S. Geological Survey and the National Academies.
- WILL T M, ZEH A, GERDES A, et al., 2009. Palaeoproterozoic to Palaeozoic magmatic and metamorphic events in the Shackleton Range, East Antarctica: constraints from zircon and monazite dating, and implications for the amalgamation of Gondwana [J]. *Precambrian Research*, 172 (1-2): 25-45.
- ZHAI M G, 2012. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86 (9): 1335-1349. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L C, ZHAI M G, WAN Y S, et al., 2012. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (11): 3431-3445. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Y, ZHANG S H, LIU X C, et al., 2007. Sub-glacial geology of Antarctica: a preliminary investigation and results in the Grove Mountains and the Vestfold Hills, East Antarctica and its tectonic implication [C] //10th International Symposium on Antarctic Sciences. U. S. Geological Survey and the National Academies.
- ZHAO Y, LIU X C, WANG W, et al., 2019. The early history and tectonic framework of East Antarctica, knowledge from the subglacial geology: a review [C] //13th International Symposium on Antarctic Earth Science, Incheon.
- ZULBATI F, HARLEY S L, 2007. Late Archean granulite facies metamorphism in the Vestfold Hills, East Antarctica [J]. *Lithos*, 93 (1-2): 39-67.

附中文参考文献

- 刘健, 赵越, 刘晓春, 等, 2011. 来自东南极西福尔丘陵附近冰碛物中沉积岩砾石的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义 [J]. *地质学报*, 85 (10): 1585-1612.
- 沈其韩, 耿元生, 宋会侠, 2016. 全球冥古宙的研究进展和存在问题 [J]. *地质学报*, 90 (9): 2083-2099.
- 翟明国, 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造 [J]. *地质学报*, 86 (9): 1335-1349.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等, 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题 [J]. *岩石学报*, 28 (11): 3431-3445.