

# 东南极 Windmill 群岛与罗迪尼亚超大陆聚合相关构造热事件的时代: 来自 Bailey 半岛镁铁质片麻岩和淡色片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的约束

王彦斌<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 任留东<sup>1</sup>, 焦永艳<sup>1</sup>, 仝来喜<sup>2</sup>, Ian S WILLIAMS<sup>3</sup>

WANG Yanbin<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, REN Liudong<sup>1</sup>, JIAO Yongyan<sup>1</sup>, TONG Laixi<sup>2</sup>, Ian S WILLIAMS<sup>3</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037;

2. 西北大学地质学系大陆动力学国家实验室, 陕西 西安 710069;

3. Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia

1. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

3. Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia

**WANG Y B, WANG H, REN L D, et al., 2021. Zircon U-Pb ages of the mafic gneiss and leucogneiss from the Bailey Peninsula: Constraints on the timing of the tectonothermal events related to the amalgamation of Rodinia in the Windmill Islands, East Antarctica [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5): 768-782. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.063**

**Abstract:** We report new geochronological data of the mafic gneiss and leucogneiss from the Windmill Islands, East Antarctica, in order to unravel the tectonothermal events related to the amalgamation of Rodinia. SHRIMP zircon U-Pb dating from the mafic gneiss (Hbl-Cpx-Opx-Bt-Pl-Qtz-Mag-Zrn) yielded early Mesoproterozoic magmatic ages of  $1403 \pm 28$  Ma from igneous cores, and middle Mesoproterozoic metamorphic ages of  $1318 \pm 34$  Ma from overgrown rims. The leucogneiss (Pl-Kfs-Qtz-Bt-Zrn) in the Bailey Peninsula has intrusive ages of  $1257 \pm 51$  Ma from magmatic origin zircon cores, and metamorphic ages of  $1197 \pm 26$  Ma from overgrown rims and/or structureless grains. The intrusive age of mafic gneiss indicates the existence of a ca. 1.40 Ga igneous activity in the Windmill Islands. This is likely the earliest igneous record of the Windmill Islands, possibly relating to the final period of igneous activity of the Mawson Continent. The age of high-grade metamorphism of the mafic gneiss from the Bailey Peninsula can be constrained by the metamorphic zircon overgrowth at  $1318 \pm 34$  Ma, suggesting that the Windmill Islands was possibly involved in the Albany-Fraser-Windmill (East Antarctic) orogeny during the 1375~1151 Ma period. This study further supports the tectonic model in which the Windmill Islands and the Albany-Fraser Orogeny are parallel convergence during the Mesoproterozoic Rodinia amalgamation.

**Key words:** SHRIMP zircon U-Pb ages; mafic gneiss; leucogneiss; Windmill Islands; East Antarctica; Rodinia

**摘 要:** 东南极 Windmill 群岛变质杂岩经历的变质和岩浆事件与西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带在时间上相对应, 并可能与罗迪尼亚超大陆的拼合有关。Windmill 群岛 Bailey 半岛的镁铁质片麻岩 (角闪石-单斜辉石-斜方辉石-黑云母-斜长石-石英-磁铁矿-锆石) 被认为具有较早的形成年龄, 其中还出露属于正

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (40773042, 41073014, 41373052, 41773049); 国家海洋局极地考察办公室对外合作项目 (IC201707)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40773042, 41073014, 41373052, 41773049) and the Polar Office of the State Oceanic Bureau of China (Grant No. CHINARE-IC201707)

**第一作者简介:** 王彦斌 (1966—), 男, 博士, 研究员, 从事同位素地质年代学和地球化学研究工作。E-mail: wangyanbin@bjshrmp.cn

**收稿日期:** 2021-06-28; **修回日期:** 2021-08-23; **责任编辑:** 范二平

**引用格式:** 王彦斌, 王浩, 任留东, 等, 2021. 东南极 Windmill 群岛与罗迪尼亚超大陆聚合相关构造热事件的时代: 来自 Bailey 半岛镁铁质片麻岩和淡色片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的约束 [J]. 地质力学学报, 27 (5): 768-782. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.063

片麻岩的淡色片麻岩(斜长石-钾长石-石英-黑云母-锆石)。对这两种片麻岩中的锆石分别进行了 SHRIMP U-Pb 年龄测定,首次获得该区镁铁质片麻岩锆石核部  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄  $1403\pm 28\text{ Ma}$ , 该年龄记录了本区中元古代早期岩浆事件,这是 Windmill 群岛地区记录的最早一期岩浆事件,可能受到了东部莫森大陆(Mawson Continent)构造岩浆活动的影响。铁镁质片麻岩锆石增生边的年龄为  $1318\pm 34\text{ Ma}$ , 则记录了早期构造热事件。淡色片麻岩中锆石核部年龄为  $1257\pm 51\text{ Ma}$ , 与 Bailey 半岛的片麻状含石榴子石花岗岩侵位年龄一致,共同记录了该区的一期岩浆活动。淡色片麻岩中锆石增生边的年龄为  $1197\pm 26\text{ Ma}$ , 记录了晚期的变质事件。这些新的年龄数据强烈支持  $1375\sim 1151\text{ Ma}$  期间东南极 Windmill 群岛与西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带相连接的构造模型,同时也为罗迪尼亚超大陆拼合过程提供了重要的年代学约束。

**关键词:** SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄; 镁铁质片麻岩; 淡色片麻岩; Windmill 群岛; 东南极; 罗迪尼亚

**中图分类号:** P597.3      **文献标识码:** A

## 0 引言

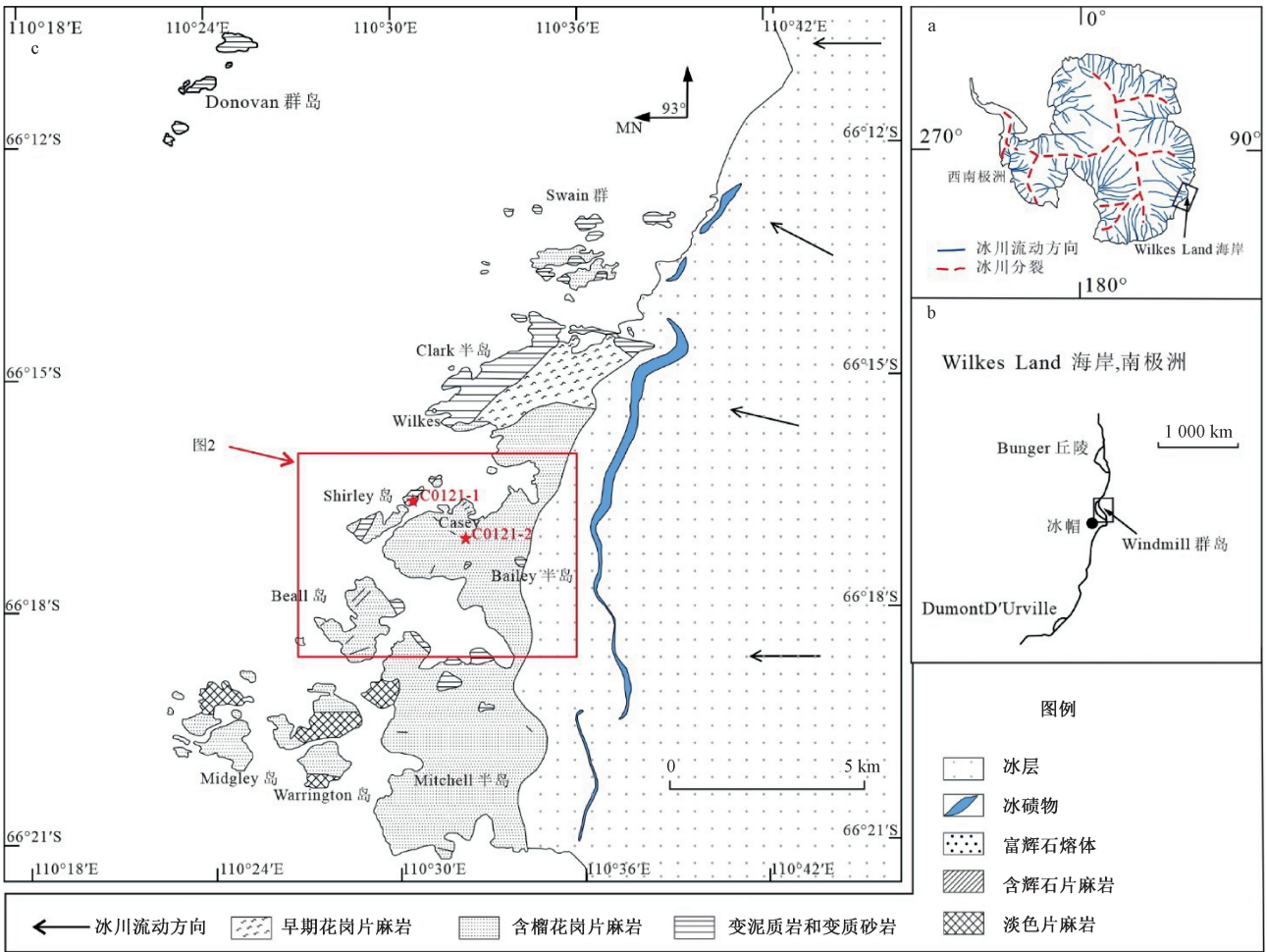
一般认为,位于东南极 Wilkes Land 的 Windmill 群岛与澳大利亚的 Albany-Fraser 造山带在中元古代罗迪尼亚超大陆形成时曾连接在一起(Harris, 1995; Post et al., 1997; Clark et al., 2000; Fitzsimons, 2000, 2003; Li et al., 2008; Boger, 2011; Zhang et al., 2012; Aitken et al., 2016; Morrissey et al., 2017a, 2017b)。东南极 Windmill 群岛出露的变质杂岩的地质特征及构造热事件年龄对比有助于罗迪尼亚超大陆形成演化的研究。相关学者曾先后提出了三种不同的构造热模型来解释 Windmill 群岛的地质演化:第一种模型认为变沉积岩原岩在 ca. 1470 Ma 沉积,随后于 ca. 1250 ~ 1100 Ma 发生单一的高级变质事件(Blight and Oliver, 1977, 1982; Oliver et al., 1983);第二种是根据同位素年代学研究提出的两阶段变质演化模型,认为 Windmill 群岛经历了两期变质作用,ca. 1400 Ma 经历第一次麻粒岩相变质事件,ca. 1000 Ma 经历随后的高角闪岩相变质事件(Williams et al., 1983);第三种模型则根据详细的野外填图、岩相学和锆石 U-Pb 定年结果认为高角闪岩相变质和变形作用( $M_1/D_1$ )和岩浆侵入发生在 ca. 1340 ~ 1300 Ma 之后,ca. 1240 ~ 1140 Ma 又叠加麻粒岩相构造热事件( $M_2/D_2$ )和岩浆活动,同时伴随 ca. 1170 Ma 的 Ford 岛花岗岩和 ca. 1160 Ma Ardery 紫苏花岗岩侵入(Paul et al., 1995; Post, 2000; Zhang et al., 2012; Morrissey et al., 2017a, 2017b)。

尽管目前对 Windmill 群岛部分露头的石榴花

岗片麻岩、副片麻岩、紫苏花岗岩和花岗岩等岩石开展了同位素年代学研究(Blight and Oliver, 1977, 1982; Oliver et al., 1983; Williams et al., 1983; Post et al., 1997; Post, 2000; Zhang et al., 2012; Morrissey et al., 2017a, 2017b),但是,被花岗岩片麻岩包裹的早期镁铁质片麻岩和属于正片麻岩的淡色片麻岩的原岩时代和变质时代一直存在疑问(Paul et al., 1995)。众所周知,与区域地质演化有关的地质构造热事件通常会被锆石记录(Hawkesworth et al., 2010),因此,文中对镁铁质片麻岩和淡色片麻岩中的锆石进行了 SHRIMP U-Pb 同位素年代学研究,以期对两类片麻岩的原岩形成时代和变质时代给予同位素年龄的厘定,并结合已有的地质及同位素年代学信息,对该区构造热事件做进一步的分析和总结,最终探讨该区的地质构造演化历程。

## 1 区域地质概况

Windmill 群岛位于 Wilkes Land 海岸,1947 年在美国海军代号为“Operation Windmill”的南极探险任务行动中首次被发现,面积大约  $400\text{ km}^2$  (图 1)。露头组成包括正片麻岩、副片麻岩和镁铁质-超镁铁质片麻岩等岩石,其中正片麻岩多为石榴花岗岩片麻岩、淡色片麻岩等,副片麻岩包括变砂屑岩、变泥质岩、混合岩化片麻岩、钙硅酸岩、条带状磁石英岩建造(BIF)、锰氧化物和含富镁假蓝宝石-矽线石-堇青石-柱晶石-硅硼镁铝矿等矿物透镜体的表壳岩。此外,还出露紫苏花岗岩、斑状花岗岩、花岗伟晶岩、含石榴子石-矽线石-蓝线石的细晶岩岩墙和晚期的粗玄岩岩墙和辉



a、b—Windmill 群岛在南极的位置；c—Windmill 群岛北部地质简图

图 1 Windmill 群岛地质简图 (据 Zhang et al. , 2012 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of the Windmill Islands (modified after Zhang et al. , 2012)

(a and b) Location of the Windmill Islands in Antarctica; (c) Sketch geological map of the northern part of the Windmill Islands

长岩岩墙等侵入岩 (Blight and Oliver, 1977, 1982; Paul et al. , 1995; Post et al. , 1997; Post, 2000; Möller et al. , 2002; Zhang et al. , 2012; Morrissey et al. , 2017a, 2017b; 图 1), 大约 70% 的露头由含石榴子石的花岗片麻岩或紫苏花岗岩组成。Windmill 群岛由北向南经历了角闪岩相到麻粒岩相的变质过程 (Blight and Oliver, 1977; Post, 2000; Möller et al. , 2002)。北部的角闪岩相片麻岩以变泥质岩的黑云母-矽线石-斜长石-堇青石-石英±石榴子石组合为特征, 镁铁质岩以黑云母-角闪石组合为特征, 峰期变质温压为 ca. 760 °C、0.5 ~ 0.6 GPa (Blight and Oliver, 1977, 1982; Post, 2000)。而南部的麻粒岩相变泥质岩中则广泛出现石榴子石, 镁铁质岩石中普遍发育单斜辉石-斜方辉石组合 (Post, 2000), 石榴紫苏斜长片麻岩记录的麻粒岩

相的峰期变质温压为 800 ± 50 °C、0.5 ~ 0.7 GPa (Post et al. , 1997; Post, 2000)。Kilpatrick and Elis (1992) 报道的南部高级变质区 Ardery 紫苏花岗岩结晶时的温压为 ca. 960 ~ 1100 °C、0.3 ~ 0.4 GPa。研究区变沉积岩被正片麻岩侵入, 被认为是该区最古老的岩石, 变沉积岩的继承锆石中含有 1450 ~ 1350 Ma 岩浆结晶年龄的锆石 (Post, 2000; Zhang et al. , 2012), 该年龄被认为是沉积原岩的最大沉积年龄或者是岩浆活动的早期记录 (Post, 2000; Zhang et al. , 2012)。侵入的正片麻岩的原岩指示有两期岩浆活动: 一期为 ca. 1315 Ma, 另一期为 ca. 1250 ~ 1210 Ma (Post, 2000; Zhang et al. , 2012, Morrissey et al. , 2017 a, 2017b)。Windmill 群岛的岩浆作用对应于两幕构造变质事件:  $M_1/D_1$  是 1340 ~ 1300 Ma 之间的高角闪岩相变质和变形事件,  $M_2/$

D<sub>2</sub> 则为 1240~1140 Ma 之间的麻粒岩相变质和变形事件 (Post et al. , 1997; Post, 2000; Zhang et al. , 2012; Morrissey et al. , 2017 a, 2017b)。Windmill 群岛的构造变质关系具有多旋回的演化特征, 早期变质 (M<sub>1</sub>) 为低压高温相, 以变泥质岩中矽线石+黑云母±堇青石组合为特征, 同时伴随着 D<sub>1</sub> 韧性变形形成的广泛的水平组构, 在 Clark 半岛可见 ca. 1315 Ma 的花岗岩侵入, 主要的挤压相 D<sub>2</sub> 的韧性变形使得 M<sub>1</sub>/D<sub>1</sub> 组构再次褶皱。在同 D<sub>2</sub> 构造时期, 长英质岩石广泛的原地部分熔融是变质峰期 M<sub>2</sub> 的特征, M<sub>2</sub> 为高级变质, 叠加在 M<sub>1</sub> 组合之上, M<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 的变质和变形向南方向逐渐增加, 在南部群岛达到麻粒岩相条件, 期间大量的含石榴子石花岗岩侵入并且具弱变形, 含石榴子石花岗岩片麻岩和片麻状含石榴子石花岗岩的岩浆年龄为 1250~1240 Ma, 记录了该事件 (Zhang et al. , 2012), 同构造 D<sub>2</sub> 和后构造 D<sub>2</sub> 正片麻岩的锆石年龄 1214±10 Ma 制约了该期事件的时代 (Post, 2000)。M<sub>2</sub> 变质事件和 D<sub>2</sub> 变形最后阶段的时代由 Windmill 群岛南部 Fold 岛年龄为 1173±9 Ma 的花岗岩和 ca. 1200~1163 Ma 的 Ardery 紫苏花岗岩侵入事件制约 (Post, 2000; Zhang et al. , 2012, Morrissey et al. , 2017a, 2017b), 且 M<sub>1</sub>/D<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 为两个独立的构造热事

件 (Paul et al. , 1995; Post, 2000)。研究区 D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub> 则分别对应了早期构造单元的南北向褶皱、北东—南西向左旋剪切和脆性断裂 (Post, 2000)。

2 样品描述

样品采自南极 Windmill 群岛 Bailey 半岛澳大利亚凯西站 (GPS 位置: 66°16'55"S; 110°31'39"E) 附近 (图 2)。镁铁质片麻岩 (样品编号: C0121-1), 露头呈灰黑色, 成层产于变砂屑岩和含石榴子石花岗片麻岩之间 (图 2), 多在含石榴子石花岗片麻岩内呈不连续的豆荚状或者透镜状, 表明其为石榴子石花岗片麻岩形成之前的连续块体 (Blight and Oliver, 1977; Paul et al. , 1995)。镁铁质片麻岩呈片麻理构造, 岩石主要由单斜辉石、紫苏辉石、角闪石、黑云母、斜长石和石英组成, 副矿物为锆石 (图 3a、3b), 为典型的麻粒岩相变质矿物组合。铁镁质片麻岩的锆石呈浅黄色, 透射光和阴极发光图像显示锆石呈浑圆状, 具核边结构, 锆石核部可见典型的岩浆结晶环带, 锆石的增生边宽窄不等 (图 4a), Th/U 比值较低 (Th/U = 0.01 ~ 0.07), 具变质锆石生长特征 (Williams et al. , 1996)。

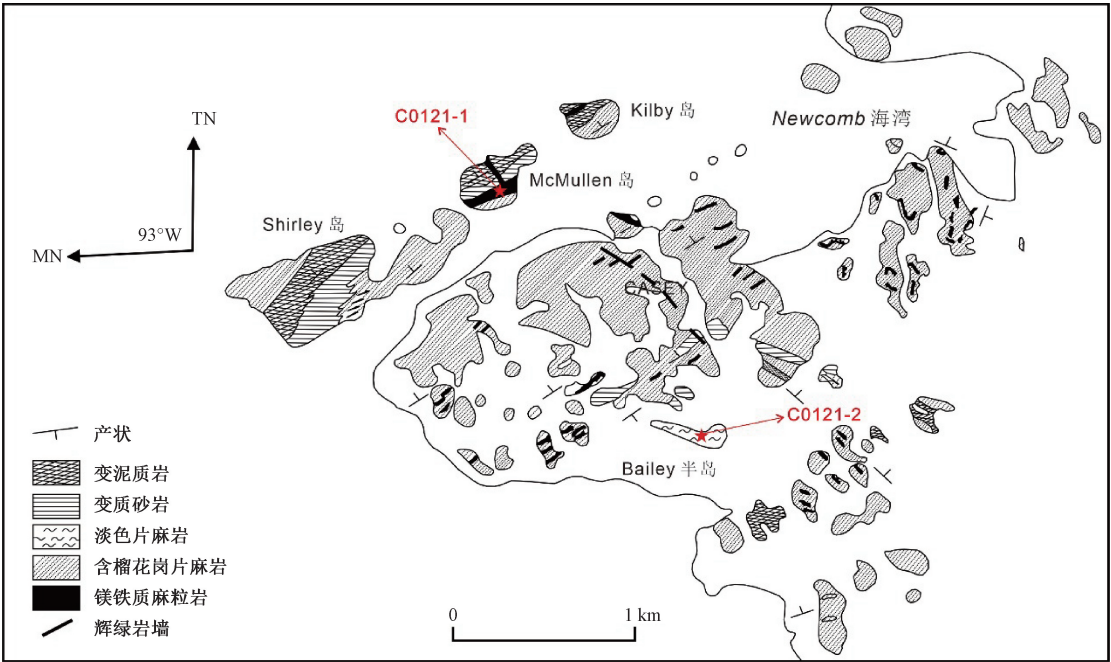
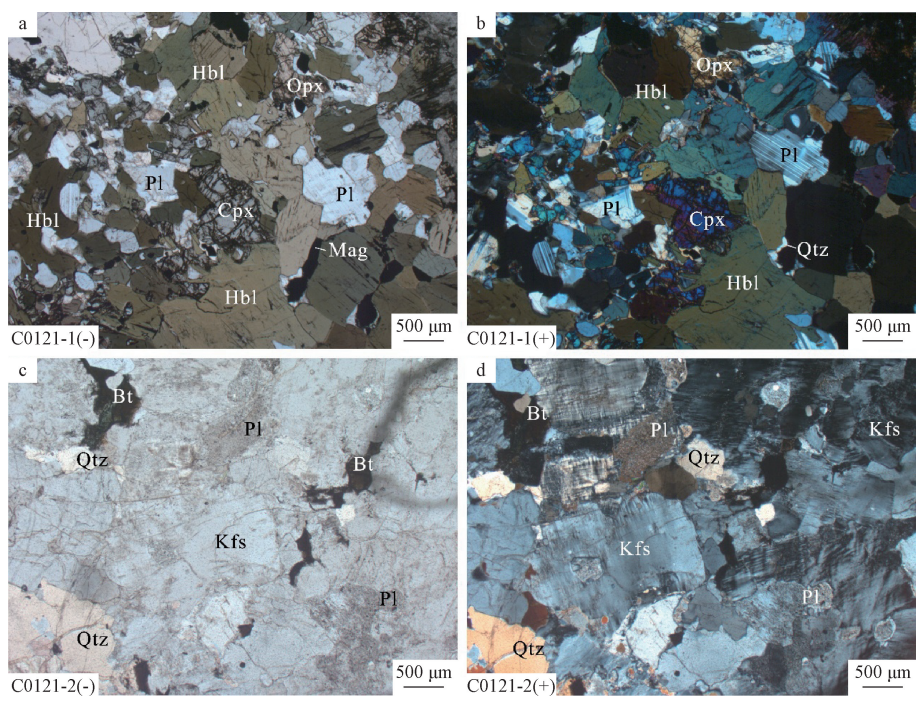


图 2 Bailey 半岛地质简图 (据 Paul et al. , 1995 修改)

Fig. 2 Geological map of the Bailey Peninsula (modified after Paul et al. , 1995)

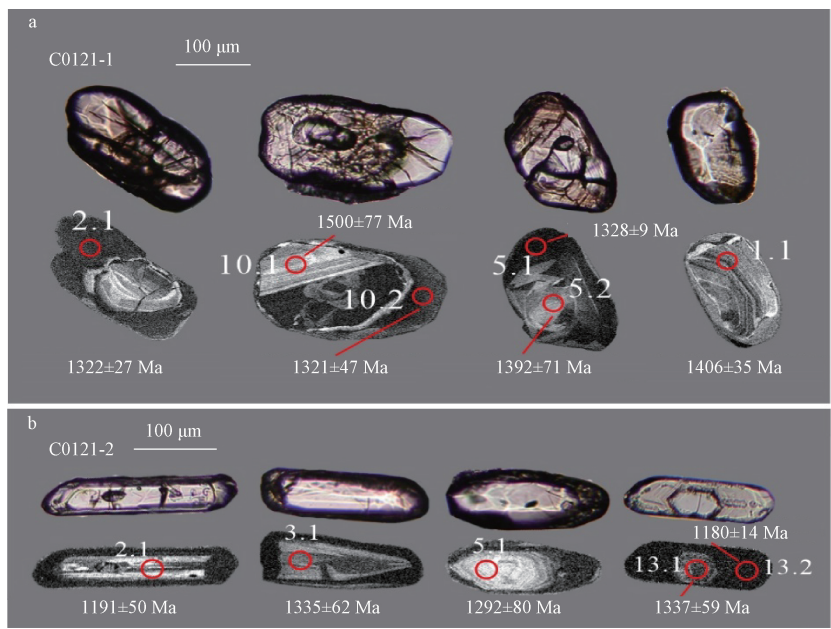


Hbl—角闪石；Opx—斜方辉石；Cpx—单斜辉石；Bt—黑云母；Pl—斜长石；Qtz—石英；Mag—磁铁矿；Kfs—钾长石  
a—镁铁质片麻岩（C0121-1），单偏光；b—镁铁质片麻岩（C0121-1），正交偏光；c—淡色片麻岩（C0121-2），单偏光；d—淡色片麻岩（C0121-2），正交偏光

图 3 Bailey 半岛镁铁质片麻岩和淡色片麻岩显微镜下照片

Fig. 3 Micrographs showing petrographic features of the mafic gneiss and leucogneiss in the Bailey Peninsula, Windmill Islands  
(a) Plane-polarized light image of mafic gneiss; (b) Cross-polarized light image of mafic gneiss; (c) Plane-polarized light image of leucogneiss; (d) Cross-polarized light image of leucogneiss

Hbl—hornblende; Opx—orthopyroxene; Cpx—clinopyroxene; Bt—biotite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Mag—magnetite; Kfs—K-feldspar



a—镁铁质片麻岩（C0121-1）；b—淡色片麻岩样品（C0121-2）

图 4 Bailey 半岛镁铁质片麻岩和淡色片麻岩样品锆石透射光和阴极发光图像

Fig. 4 Characteristic images of the analyzed zircons from the mafic gneiss and leucogneiss in the Bailey Peninsula

(a) The mafic gneiss sample (C0121-1); (b) The leucogneiss sample (C0121-2)

淡色片麻岩(样品编号:C0121-2)呈灰白色,主要由斜长石、钾长石、石英组成,含极少量的黑云母,副矿物主要为磁铁矿、锆石(图3c、3d),其周缘为含石榴子石花岗片麻岩(图2)。淡色片麻岩的锆石呈浅黄色,其透射光和阴极发光图像显示锆石呈长柱状、浑圆状,具核边结构,锆石晶体核部具典型的岩浆结晶环带,增生边宽窄不一,宽的增生边对应锆石核已经很小,部分锆石显示溶蚀核的重结晶特征,部分锆石已经重结晶变为无结构高U的新生锆石颗粒(图4b),Th/U比值较低(Th/U=0.02~0.07),具高级变质锆石生长特征(Williams, 2001)。

### 3 测试方法

把锆石从0.5 kg的样品中分选出来,在双目镜下挑选具有代表性的颗粒。将待测锆石与澳大利亚国立大学地球科学研究院(RSES)的一粒锆石标样SL13及数粒锆石标样TEM置于环氧树脂中做成样品靶(Mount)。将靶上的锆石磨至约厚度的一半,以使锆石内部暴露。接着进行透射、反射照相、阴极发光(CL)分析、抛光、清洗、镀金,然后进行SHRIMP分析(宋彪, 2015)。上述碎样、挑选、透反射照相以及CL照相均在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成,其中CL的目的是在进行SHRIMP U-Pb分析时,参考锆石颗粒剖面的阴极发光图像,以便对锆石颗粒的不同区域U、Th、Pb同位素成分进行分析。锆石SHRIMP U-Pb分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的SHRIMP II上完成。详细分析流程和原理见参考文献Williams (1998)。一次离子源气体为氧气,将其电离后,由 $O_2^+$ 打击锆石颗粒,激发出铈、铅、铀、钍的氧化物离子或金属离子。测定 $^{196}Zr_2O$ 、 $^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb$ 、 $^{207}Pb$ 、 $^{208}Pb$ 、 $^{238}U$ 、 $^{248}ThO$ 、 $^{254}UO$ 质量峰的强度,每个峰的积分时间分别为2.0、10.0、10.0、10.0、15.0、5.0、5.0、2.0、2.0秒,每个点的数据由5次扫描组成。一次离子为约4.5 nA、10 kV的 $O_2^+$ ,打到锆石上束斑的直径为25~30  $\mu m$ ,质量分辨率约5400(1%峰高)。将待分析未知点与标样TEM的点交叉进行分析。应用RSES的锆石SL13(572 Ma、 $238 \times 10^{-6}$ )标定样品的U、Th、Pb含量,Temora(417.2 Ma)

进行年龄校正。数据处理采用SQUID 1.02及ISOPLLOT程序,详细分析流程和原理参考文献(Ludwig, 2001)。普通铅根据实测的 $^{204}Pb$ 进行校正,加权平均年龄具95%的置信度( $2\sigma$ )。

### 4 锆石 U-Pb 定年实验结果

采用SHRIMP U-Pb方法对镁铁质片麻岩中锆石核部和锆石增生边分别进行了U-Pb年龄分析,其中岩浆结晶锆石核部分析了12个测点,锆石增生边分析了7个测点。所有测点中除3.1不和谐度为-22%外,其余18个锆石测点的不和谐度范围为-6%~3%(表1,图5)。12个锆石核部测点的U含量变化范围为 $26 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$ ,Th含量变化范围为 $11 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ ,Th/U=0.28~0.56,锆石核部的U含量较低,测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄误差稍大。不含测点3.1( $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄为 $1224 \pm 200$  Ma)的其他11个锆石核部测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄范围从 $1239 \pm 22$  Ma到 $1500 \pm 77$  Ma, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 $1403 \pm 28$  Ma,MSWD=0.64。样品7个锆石增生边测点的U含量变化范围为 $127 \times 10^{-6} \sim 1910 \times 10^{-6}$ ,Th含量变化范围为 $0 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$ ,Th/U=0~0.07, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄范围从 $1205 \pm 22$  Ma到 $1392 \pm 71$  Ma, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 $1318 \pm 34$  Ma,MSWD=6.5。不包括年龄最小的测点14.1( $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄为 $1205 \pm 22$  Ma),其余6个锆石增生边测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 $1318 \pm 34$  Ma,MSWD=3.0。

对长英质淡色片麻岩样品中锆石核部、锆石增生边及无结构高U的新生锆石颗粒分别进行了SHRIMP U-Pb年龄分析,其中岩浆结晶锆石核部分析了8个测点,锆石增生边及无结构高U的新生锆石分析了7个测点。所有颗粒测点中除7.1测点不和谐度达15%外,其余14个锆石测点的不和谐度范围为-6%~10%(表1,图6)。8个锆石核部测点的U含量范围为 $92 \times 10^{-6} \sim 506 \times 10^{-6}$ ,Th含量范围为 $112 \times 10^{-6} \sim 1698 \times 10^{-6}$ ,Th/U=0.62~2.78,U含量低,测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄误差大,8个锆石核部测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄范围从 $1191 \pm 50$  Ma到 $1395 \pm 78$  Ma, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄加权平均年龄为 $1257 \pm 51$  Ma,MSWD=1.4。样品锆石增生边和无结构高U的新生锆石的U含量范围为 $1698 \times 10^{-6} \sim 3436 \times 10^{-6}$ ,Th含量范围为 $33 \times 10^{-6} \sim 233 \times 10^{-6}$ ,

表1 Bailey 半岛镁铁质片麻岩和淡色片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 同位素数据

Table 1 SHRIMP U-Pb isotopic analytical data of the mafic gneiss and leucogneiss from the Bailey Peninsula, Windmill Islands

| 点号             | 206Pb <sub>c</sub> /% |                       |                       | 含量/×10 <sup>-6</sup> |     |                      | 232Th/ <sup>238</sup> U |                          |     | 年龄/Ma                   |     |      | 同位素比值                                               |      |                                       |      |                                       |      |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----|-------------------------|-----|------|-----------------------------------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
|                | 206Pb <sub>c</sub> /% | 206Pb <sub>c</sub> /% | 206Pb <sub>c</sub> /% | U                    | Th  | 206Pb <sub>c</sub> * | 232Th/ <sup>238</sup> U | 207Pb/ <sup>206</sup> Pb | ±1σ | 206Pb/ <sup>238</sup> U | ±1σ | 不和谐度 | 207Pb <sup>*</sup> / <sup>206</sup> Pb <sup>*</sup> | ±1%  | 207Pb <sup>*</sup> / <sup>235</sup> U | ±1%  | 206Pb <sup>*</sup> / <sup>238</sup> U | 误差   |
| C0121-1 镁铁质片麻岩 |                       |                       |                       |                      |     |                      |                         |                          |     |                         |     |      |                                                     |      |                                       |      |                                       |      |
| 1.1c           | 0.07                  | 0.07                  | 0.07                  | 117                  | 60  | 25.7                 | 0.53                    | 1406                     | 35  | 1462                    | 12  | -4   | 0.0891                                              | 1.8  | 3.126                                 | 2.0  | 0.2545                                | 0.91 |
| 2.1r           | 0.07                  | 0.07                  | 0.07                  | 218                  | 7   | 43.7                 | 0.03                    | 1322                     | 27  | 1352                    | 8   | -2   | 0.0853                                              | 1.4  | 2.745                                 | 1.5  | 0.2334                                | 0.7  |
| 3.1c           | 2.5                   | 2.5                   | 2.5                   | 26                   | 11  | 6.02                 | 0.42                    | 1224                     | 200 | 1490                    | 28  | -22  | 0.0811                                              | 10.0 | 2.91                                  | 11.0 | 0.2601                                | 2.1  |
| 4.1c           | 0.15                  | 0.15                  | 0.15                  | 79                   | 42  | 17.1                 | 0.54                    | 1439                     | 44  | 1441                    | 15  | 0    | 0.0906                                              | 2.3  | 3.13                                  | 2.6  | 0.2505                                | 1.1  |
| 5.1r           | 0.04                  | 0.04                  | 0.04                  | 1910                 | 0   | 362                  | 0.00                    | 1328                     | 9.1 | 1284                    | 3   | 3    | 0.08556                                             | 0.47 | 2.599                                 | 0.55 | 0.22032                               | 0.29 |
| 5.2r           | 1.35                  | 1.35                  | 1.35                  | 127                  | 1   | 27                   | 0.01                    | 1392                     | 71  | 1406                    | 12  | -1   | 0.0884                                              | 3.7  | 2.97                                  | 3.8  | 0.2437                                | 0.99 |
| 6.1c           | 0.29                  | 0.29                  | 0.29                  | 118                  | 47  | 24.8                 | 0.41                    | 1359                     | 42  | 1406                    | 12  | -3   | 0.0869                                              | 2.2  | 2.922                                 | 2.4  | 0.2438                                | 0.97 |
| 7.1c           | 0.27                  | 0.27                  | 0.27                  | 92                   | 30  | 20.1                 | 0.34                    | 1399                     | 48  | 1458                    | 14  | -4   | 0.0888                                              | 2.5  | 3.107                                 | 2.7  | 0.2539                                | 1.1  |
| 8.1c           | 0.0                   | 0.0                   | 0.0                   | 70                   | 38  | 15.8                 | 0.56                    | 1451                     | 43  | 1497                    | 23  | -3   | 0.0912                                              | 2.3  | 3.288                                 | 2.9  | 0.2614                                | 1.8  |
| 9.1c           | 0.1                   | 0.1                   | 0.1                   | 108                  | 39  | 23                   | 0.37                    | 1361                     | 39  | 1431                    | 13  | -5   | 0.087                                               | 2.0  | 2.982                                 | 2.3  | 0.2486                                | 1.0  |
| 10.1c          | 0.92                  | 0.92                  | 0.92                  | 66                   | 23  | 14.9                 | 0.36                    | 1500                     | 77  | 1503                    | 20  | 0    | 0.0936                                              | 4.1  | 3.39                                  | 4.3  | 0.2626                                | 1.5  |
| 10.2r          | 0.08                  | 0.08                  | 0.08                  | 200                  | 5   | 40.9                 | 0.03                    | 1321                     | 47  | 1375                    | 10  | -4   | 0.0853                                              | 2.4  | 2.795                                 | 2.6  | 0.2378                                | 0.77 |
| 11.1c          | 0.34                  | 0.34                  | 0.34                  | 80                   | 24  | 17.3                 | 0.31                    | 1433                     | 67  | 1440                    | 15  | 0    | 0.0904                                              | 3.5  | 3.12                                  | 3.7  | 0.2503                                | 1.2  |
| 12.1c          | 0.57                  | 0.57                  | 0.57                  | 39                   | 11  | 8.74                 | 0.28                    | 1389                     | 69  | 1473                    | 22  | -6   | 0.0883                                              | 3.6  | 3.13                                  | 3.9  | 0.2567                                | 1.7  |
| 13.1r          | 0.0                   | 0.0                   | 0.0                   | 202                  | 5   | 41.8                 | 0.02                    | 1324                     | 27  | 1389                    | 9   | -5   | 0.0854                                              | 1.4  | 2.832                                 | 1.6  | 0.2405                                | 0.73 |
| 14.1r          | 0.0                   | 0.0                   | 0.0                   | 388                  | 25  | 70.9                 | 0.07                    | 1205                     | 22  | 1242                    | 6   | -3   | 0.08032                                             | 1.1  | 2.353                                 | 1.2  | 0.2125                                | 0.55 |
| 15.1c          | 1.19                  | 1.19                  | 1.19                  | 54                   | 25  | 11.6                 | 0.48                    | 1343                     | 130 | 1423                    | 20  | -6   | 0.0862                                              | 6.7  | 2.94                                  | 6.9  | 0.247                                 | 1.5  |
| 16.1c          | 0.29                  | 0.29                  | 0.29                  | 108                  | 32  | 22                   | 0.31                    | 1387                     | 39  | 1374                    | 18  | 1    | 0.0882                                              | 2.0  | 2.888                                 | 2.5  | 0.2375                                | 1.5  |
| 17.1r          | 0.0                   | 0.0                   | 0.0                   | 387                  | 22  | 68.9                 | 0.06                    | 1239                     | 22  | 1215                    | 6   | 2    | 0.08173                                             | 1.1  | 2.338                                 | 1.3  | 0.2074                                | 0.56 |
| C0121-2 淡色片麻岩  |                       |                       |                       |                      |     |                      |                         |                          |     |                         |     |      |                                                     |      |                                       |      |                                       |      |
| 1.1r           | 0.02                  | 0.02                  | 0.02                  | 1698                 | 33  | 314                  | 0.02                    | 1196                     | 11  | 1256                    | 15  | -5   | 0.07996                                             | 0.54 | 2.373                                 | 1.4  | 0.2152                                | 1.3  |
| 2.1c           | 0.2                   | 0.2                   | 0.2                   | 92                   | 170 | 17.1                 | 1.91                    | 1191                     | 50  | 1264                    | 19  | -6   | 0.0798                                              | 2.6  | 2.382                                 | 3.1  | 0.2166                                | 1.7  |
| 3.1c           | 0.48                  | 0.48                  | 0.48                  | 55                   | 112 | 10.8                 | 2.09                    | 1335                     | 62  | 1315                    | 23  | 2    | 0.0859                                              | 3.2  | 2.68                                  | 3.7  | 0.2262                                | 2.0  |
| 4.1r           | 0.02                  | 0.02                  | 0.02                  | 2484                 | 127 | 418                  | 0.05                    | 1229                     | 11  | 1152                    | 13  | 6    | 0.08132                                             | 0.56 | 2.195                                 | 1.4  | 0.1957                                | 1.3  |
| 5.1c           | 0.82                  | 0.82                  | 0.82                  | 106                  | 125 | 18.2                 | 1.22                    | 1292                     | 80  | 1166                    | 19  | 10   | 0.084                                               | 4.1  | 2.29                                  | 4.5  | 0.1982                                | 1.8  |
| 6.1r           | 0.04                  | 0.04                  | 0.04                  | 3400                 | 194 | 577                  | 0.06                    | 1247                     | 10  | 1161                    | 14  | 7    | 0.08207                                             | 0.53 | 2.233                                 | 1.4  | 0.1973                                | 1.3  |
| 7.1c           | 0.69                  | 0.69                  | 0.69                  | 153                  | 411 | 26.7                 | 2.78                    | 1395                     | 78  | 1186                    | 18  | 15   | 0.0886                                              | 4.1  | 2.47                                  | 4.4  | 0.2021                                | 1.7  |
| 8.1r           | 0.02                  | 0.02                  | 0.02                  | 3436                 | 233 | 576                  | 0.07                    | 1181                     | 11  | 1149                    | 13  | 3    | 0.07936                                             | 0.54 | 2.135                                 | 1.4  | 0.1951                                | 1.3  |
| 9.1c           | 0.34                  | 0.34                  | 0.34                  | 129                  | 217 | 22.6                 | 1.73                    | 1240                     | 45  | 1189                    | 18  | 4    | 0.0818                                              | 2.3  | 2.285                                 | 2.8  | 0.2026                                | 1.6  |
| 10.1c          | 0.28                  | 0.28                  | 0.28                  | 150                  | 183 | 26.7                 | 1.26                    | 1229                     | 51  | 1213                    | 27  | 1    | 0.0813                                              | 2.6  | 2.321                                 | 3.6  | 0.207                                 | 2.5  |
| 11.1r          | 0.09                  | 0.09                  | 0.09                  | 2648                 | 110 | 455                  | 0.04                    | 1277                     | 11  | 1173                    | 14  | 8    | 0.08331                                             | 0.56 | 2.293                                 | 1.4  | 0.1996                                | 1.3  |
| 12.1c          | 0.51                  | 0.51                  | 0.51                  | 506                  | 305 | 87.7                 | 0.62                    | 1226                     | 34  | 1179                    | 15  | 4    | 0.0812                                              | 1.7  | 2.246                                 | 2.2  | 0.2006                                | 1.4  |
| 13.1c          | 1.33                  | 1.33                  | 1.33                  | 328                  | 288 | 61.1                 | 0.9                     | 1337                     | 59  | 1248                    | 17  | 7    | 0.0859                                              | 3.1  | 2.53                                  | 3.4  | 0.2135                                | 1.5  |
| 13.2r          | 0.08                  | 0.08                  | 0.08                  | 2336                 | 76  | 384                  | 0.03                    | 1180                     | 14  | 1127                    | 13  | 5    | 0.07932                                             | 0.7  | 2.089                                 | 1.5  | 0.191                                 | 1.3  |
| 14.1r          | 0.35                  | 0.35                  | 0.35                  | 2191                 | 73  | 366                  | 0.03                    | 1192                     | 16  | 1142                    | 14  | 4    | 0.07979                                             | 0.81 | 2.133                                 | 1.5  | 0.1939                                | 1.3  |

注：误差为1s；Pb<sub>c</sub>和Pb<sub>o</sub>分别表示普通铅和放射成因铅；标准校正值的误差为1.03%；普通铅校正应用<sup>204</sup>Pb实测值；c：锆石核（core）；r：锆石增生边（rim）

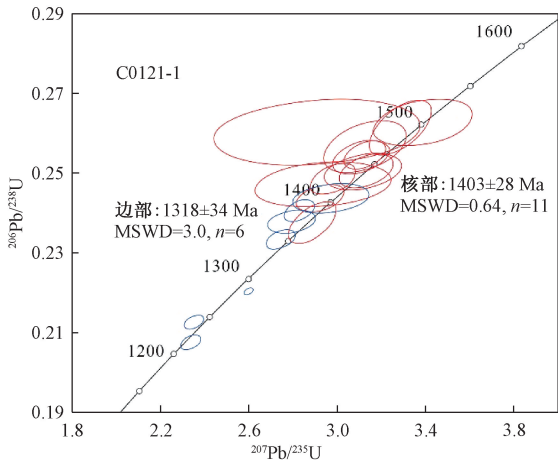


图 5 Bailey 半岛镁铁质片麻岩样品锆石 U-Pb 谐和图  
Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircons from the mafic gneiss in the Bailey Peninsula

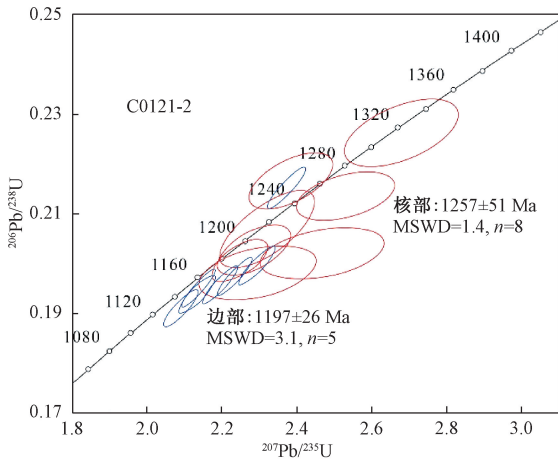


图 6 Bailey 半岛淡色片麻岩样品锆石 U-Pb 谐和图  
Fig. 6 U-Pb concordia diagram of the zircons from the leucogneiss in the Bailey Peninsula

Th/U = 0.02 ~ 0.07, 锆石增生边的 7 个测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄范围从  $1180 \pm 14$  Ma 到  $1277 \pm 11$  Ma,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1197 \pm 26$  Ma, MSWD = 10.6, 不包括年龄较大的测点 6.1 ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1247 \pm 10$  Ma) 和 11.1 ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1277 \pm 11$  Ma), 其余 5 个锆石增生边和无结构高 U 的新生锆石测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1197 \pm 26$  Ma, MSWD=3.1。

## 5 分析与讨论

### 5.1 镁铁质片麻岩原岩形成时代和变质事件的年龄

镁铁质片麻岩为变火成岩 (Blight and Oliver,

1977; Paul et al., 1995; Post et al., 1997), 属于变形前的岩石 (Blight and Oliver, 1977; Paul et al., 1995)。岩石的锆石呈浑圆状, 具核边结构, 锆石晶体核部具岩浆结晶环带, 锆石的增生边宽窄不均匀, 部分锆石增生边较窄, 锆石核部的岩浆环带和高 Th/U 比值 ( $>0.1$ ) 指示其原岩具岩浆岩特征 (Williams and Claesson, 1987; Kinny et al., 1990; Maas et al., 1992)。11 个锆石核部测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1403 \pm 28$  Ma, MSWD=0.64, 这可能代表了镁铁质片麻岩原岩经历的中元古代中期的岩浆事件年龄, 对应 ca. 1415 ~ 1400 Ma 期间 Musgrave 西和 Madura 省俯冲到 Loongana-Papulankutja 弧下开始的岩浆事件 (Aitken et al., 2016)。Hf 同位素研究表明, Windmill 群岛地质体的新生物质与澳大利亚 Albany-Fraser 造山带东缘 Madura 省增生的新生物质一致 (Spaggiari and Smithies, 2015; Morrissey et al., 2017a, 2017b); Windmill 群岛、Albany-Fraser 造山带东缘和 Musgrave Inlier (Arid Basin) 同时在 ca. 1600 ~ 1305 Ma 发生沉积, 并推测沉积于弧前-前陆盆地等被动边缘环境, 主要的碎屑来自于大洋岛弧 (1.4 Ga) (Spaggiari and Smithies, 2015); 而 Morrissey et al. (2017a, 2017b) 则认为沉积于弧后环境。根据与 Windmill 群岛东部地质体的地质事件年龄对比, 认为新发现的  $1403 \pm 28$  Ma 的镁铁质片麻岩原岩指示的岩浆作用可能是其东部莫森大陆的构造岩浆活动在该区的响应记录 (Payne et al., 2009; Liu et al., 2018; 图 7)。镁铁质片麻岩 6 个锆石增生边测点的 Th/U 比值较低 ( $<0.1$ ), 具有高级变质作用期间次固相锆石的生长特征 (Williams et al., 1996)。其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1318 \pm 34$  Ma, 记录了该区高级变质作用期间锆石重结晶作用。该变质年龄对应区域高角闪-麻粒岩岩相变质和变形作用 ( $M_1/D_1$ ) 的时间 ca. 1340 ~ 1300 Ma, 由于 Windmill 群岛地区经历了早期高角闪-麻粒岩相 ( $M_1$ ) 和晚期叠加的麻粒岩相 ( $M_2$ ) 变质事件, 岩石中同位素体系经历了多次重结晶叠加扰动,  $1318 \pm 34$  Ma 的锆石增生边年龄可能仅记录了该区高角闪-麻粒岩相高级变质事件 ( $M_1$ )。Windmill 群岛以西约 400 km 的 Bunger 丘陵高级变质岩的变质锆石的特征与此类似 (Tucker et al., 2017)。其他地区也报道过由锆石生长所记录的高级变质事件 (He et al., 2018;

Kadowaki et al., 2019; 翟明国, 2019; Hirayama et al., 2020)。

## 5.2 淡色片麻岩原岩形成时代和变质事件的年龄

Bailey 半岛地质图 (图 2) 中可见淡色片麻岩 (C0121-2) 周缘岩石为含石榴子石花岗片麻岩, 在 Midgley 和 Holli 岛淡色片麻岩产出与含石榴子石花岗片麻岩有关, 可见长英质片麻岩逐渐过渡到淡色片麻岩再到含石榴子石花岗片麻岩 (图 1; Paul et al., 1995), 认为是同变质-变形后  $D_2$  的变火成岩 (Post et al., 1997), 淡色片麻岩中锆石核部具有典型的岩浆结晶环带和高的 Th/U 比值 ( $>0.1$ ), 指示其原岩为花岗质侵入岩 (Williams and Claesson, 1987; Kinny et al., 1990; Maas et al., 1992; 徐芹芹等, 2015)。锆石核部 8 个测点记录的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均年龄为  $1257 \pm 51$  Ma,  $\text{MSWD}=1.4$ , 指示淡色片麻岩原岩年龄主体, 记录了淡色片麻岩原岩的结晶年龄。Zhang et al. (2012) 报道了 Bailey 半岛 2 块含石榴子石花岗片麻岩样品和 1 块片麻状含石榴子石花岗岩的侵位年龄分别为  $1247 \pm 13$  Ma、 $1258 \pm 12$  Ma、 $1242 \pm 13$  Ma, 这些岩石的继承锆石年龄  $1372 \pm 13$  Ma, 可见此次所测淡色片麻岩锆石核部的年龄在误差范围内与石榴子石花岗片麻岩围岩的侵位年龄一致, 指示同时期的岩浆活动。样品中锆石增生边测点 6.1 和测点 11.1 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄分别为  $1247 \pm 10$  Ma 和  $1277 \pm 11$  Ma, 与锆石核部测点 9.1 的年龄一致, 可能为溶蚀核的混合年龄。其余锆石增生边和无结构高 U 的新生锆石的 5 个测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1197 \pm 26$  Ma。结合该区经历了麻粒岩相变质作用, 以及淡色片麻岩与含石榴子石花岗片麻岩的接触关系 (Paul et al., 1995), 把锆石增生边和无结构高 U 的新生锆石的  $1197 \pm 26$  Ma 的年龄解释为高级变质作用的事件年龄 ( $M_2$ )。实际上, 从同位素年龄数据上看, 锆石核部  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄  $1257 \pm 51$  Ma 和增生边和无结构高 U 的新生锆石的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄  $1197 \pm 26$  Ma 十分相近, 说明该岩石经历的岩浆事件和变质事件的时间十分短暂。

## 5.3 Windmill 群岛主要构造热事件年代格架的同位素年龄记录

根据研究区已获得的构造、岩浆、变质、同位素 (包括锆石、独居石和石榴子石-全岩 Sm-Nd 同位素年龄信息) 等资料总结了该区主要构造热

事件年代格架 (Oliver et al., 1983; Williams et al., 1983; Post et al., 1997; Post, 2000; Möller et al., 2002; Zhang et al., 2012; Morrissey et al., 2017a, 2017b)。已有的 Windmill 群岛部分露头年代学资料表明该区的主要构造热事件发生在中元古代, 变沉积岩序列的沉积建造沉积于 1450~1350 Ma 之间, 之后经历了两幕高级构造热事件, 第一幕为发生在 ca. 1340~1300 Ma 的高角闪相变质作用 ( $M_1$ ) 和广泛的变形事件 ( $D_1$ ), 随后在 ca. 1240~1140 Ma 叠加了第二幕的麻粒岩相事件 ( $M_2$ )、两次变形事件 ( $D_{2a}$  和  $D_{2b}$ ) 以及有关的岩浆活动, 如 ca. 1170 Ma Ford 岛花岗岩、ca. 1200~1163 Ma Ardery 紫苏花岗岩、ca. 1138 Ma 细晶岩墙侵位 (Post et al., 1997; Post, 2000; Zhang et al., 2012; Morrissey et al., 2017a, 2017b)。根据对区内镁铁质片麻岩和淡色片麻岩首次开展的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测试结果, 结合已有的资料对该区锆石年龄记录的地质演化进行了总结, 详见表 2。

### 5.3.1 中元古代早期 (ca. 1400~1370 Ma) 岩浆作用

此次报道的 Bailey 半岛的镁铁质片麻岩的锆石核部  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1403 \pm 28$  Ma, 代表原岩结晶年龄, 指示该区存在中元古代中期的岩浆活动; Bailey 石榴子石花岗片麻岩和片麻状石榴花岗岩中也含有 1372 Ma 的岩浆成因的锆石 (Zhang et al., 2012), 进一步证实了研究区最早期的岩浆活动可追溯到中元古代早期 (ca. 1400~1370 Ma)。

### 5.3.2 中元古代中期 (ca. 1450~1350 Ma) 变沉积岩的原岩沉积时代

Windmill 群岛 Chappel 岛变沉积岩进行的 SHRIMP U-Pb 年龄测试获得的最小年龄为 ca. 1450 Ma (Williams et al., 1983); Clark 半岛的石榴黑云斜长片麻岩中淡色体中继承锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄峰值为 ca. 3000~2400 Ma、ca. 1800~1700 Ma、ca. 1600~1500 Ma、ca. 1450~1400 Ma; Herring 岛含硅硼镁铝矿-柱晶石副片麻岩的锆石年龄为 ca. 1350 Ma, 指示变沉积岩的原岩沉积时代在 ca. 1450~1350 Ma 之前 (Williams et al., 1983; Post, 2000; Zhang et al., 2012)。Cameron 岛、Mitchell 半岛、Robinson 脊、Herring 岛的 4 个变沉积岩碎屑锆石核部中最年轻的、具岩浆振荡环带的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为  $1338 \pm 24$  Ma、 $1354 \pm 22$  Ma、

表 2 东南极 Windmill 群岛地质演化的锆石和独居石 U-Pb 年龄和石榴子石-全岩 Sm-Nd 同位素年龄记录

Table 2 Summary of litho-tectonic and metamorphic evolution as determined by U-Pb SHRIMP zircon and monazite analyses and Grt-WR Sm-Nd data

| 地质事件                                                     |  | 样品地点及形式                                              | 年龄/Ma                     | 分析方法                               | 参考文献                    |
|----------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Balaena 岛辉长岩侵入<br>晚期粗玄岩墙侵入<br>细晶岩墙侵入                     |  |                                                      | 519                       | 斜长石 K-Ar                           | Webb et al., 1963       |
|                                                          |  |                                                      |                           |                                    |                         |
|                                                          |  |                                                      |                           |                                    |                         |
| Robinson 脊                                               |  |                                                      | 1138±9                    | 锆石 SHRIMP U-Pb                     |                         |
| 变形作用 (D <sub>4</sub> )                                   |  | 北东-南西向左旋剪切和脆性断裂                                      |                           |                                    |                         |
| 橄辉石辉长岩墙侵入                                                |  | 早期构造单元的南北向褶皱                                         |                           |                                    | Post, 2000              |
| 变形作用 (D <sub>3</sub> )                                   |  | 紧闭到等斜 F2 褶皱                                          |                           |                                    |                         |
| 变形作用 (D <sub>2</sub> )                                   |  |                                                      |                           |                                    |                         |
| Ardery 紫苏花岗岩岩位                                           |  | Bosner 岛                                             | 1163±7                    | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Robinson 脊                                           | 1178±7, 1178±6            | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Morrissey et al., 2017b |
|                                                          |  | Robinson 脊                                           | 1196±8, 1205±13           | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Zhang et al., 2012      |
|                                                          |  | Ford 岛                                               | 1173±9                    | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
| Ford 岛花岗岩岩位                                              |  |                                                      |                           |                                    | Morrissey et al., 2017b |
|                                                          |  | 黑云母花岗岩侵入变沉积岩                                         | 1235±7                    | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   |                         |
|                                                          |  | Mitchell 半岛                                          | 1137±3                    | Sm-Nd (Grt-WR)                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Mitchell 半岛混合岩淡色体                                    | 1142±7                    | 独居石 SHRIMP U-Pb                    | Post, 2000              |
| 麻粒岩相和部分熔融和<br>变形作用 (M <sub>2</sub> /D <sub>2</sub> )     |  | Herring 岛麻粒岩变质事件                                     | 1156±17                   | Sm-Nd (Grt-WR)                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Bailey 半岛正片麻岩                                        | 1169±7                    | 独居石 HRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Clark 半岛正片麻岩                                         | 1171±9                    | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Herring 岛麻粒岩锆石变质增长边                                  | 1171±13                   | 独居石 SHRIMP U-Pb                    | Post, 2000              |
|                                                          |  | Bailey 半岛含正片麻岩                                       | 1171±6                    | 独居石 SHRIMP U-Pb                    | Post, 2000              |
|                                                          |  | Clark 半岛石榴黑云片麻岩淡色体                                   | ca. 1325~1170             | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Morrissey et al., 2017b |
|                                                          |  | Cameron 岛、Herring 岛、Mitchell 半岛和 Robinson 脊变沉积岩锆石变质边 | 1177±4, 1200~1170, 1185±8 | 独居石 LA-ICPMS U-Pb                  | Morrissey et al., 2007a |
|                                                          |  | Mitchell 半岛、Herring 岛变泥质岩                            | 1214±10                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Bailey 半岛正片麻岩同变质至变形后 D <sub>2a</sub> 锆石变质增生          | 1197±26                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | 文中                      |
|                                                          |  | Bailey 半岛淡色片麻岩锆石变质增生边                                | ca. 1210~1180             | 锆石和独居石 SHRIMP U-Pb, Sm-Nd (Grt-WR) | Post et al., 1997       |
| 花岗质岩石的侵入                                                 |  | 麻粒岩相重结晶                                              |                           |                                    |                         |
|                                                          |  | Bailey 含石榴子石花岗岩片麻岩侵入位和片麻状含石榴子石花岗岩                    | 1242±13, 1247±13, 1258±12 | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Zhang et al., 2012      |
|                                                          |  | Bailey 半岛淡色片麻岩原岩侵入位                                  | 1257±51                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | 文中                      |
|                                                          |  | Clark 半岛正片麻岩                                         | 1315±6                    | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
| 高角闪岩-麻粒岩相变质作用<br>和变形作用 (M <sub>1</sub> /D <sub>1</sub> ) |  | Clark 半岛正片麻岩                                         | 1323±7                    | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Morrissey et al., 2017b |
|                                                          |  | 角闪岩相重结晶                                              | ca. 1400~1300             | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post et al., 1997       |
|                                                          |  | Mitchell 半岛变泥质岩                                      | 1305±7                    | 独居石 LA-ICPMS U-Pb                  | Morrissey et al., 2007a |
|                                                          |  | Bailey 半岛镁铁质片麻岩变质                                    | 1318±34                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | 文中                      |
| 变沉积岩原岩沉积时代                                               |  | Clark 半岛石榴黑云片麻岩淡色体                                   | 1342±21                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Cameron 岛、Herring 岛、Mitchell 半岛和 Robinson 脊变沉积岩      | ca. 1350~1315             | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Morrissey et al., 2017b |
|                                                          |  | Herring 岛石榴基青黑云片麻岩                                   | ca. 1400~1350             | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post, 2000              |
|                                                          |  | Chappel 岛                                            | 1450±80                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Williams et al., 1983   |
| 花岗岩的侵入<br>镁铁质岩石的侵入                                       |  |                                                      | ca. 2500~1700             | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | Post et al., 1997       |
|                                                          |  | Bailey 半岛石榴花岗岩片麻岩、片麻状石榴花岗岩 (继承锆石)                    | 1372±13                   | 锆石 LA-ICPMS U-Pb                   | Zhang et al., 2012      |
| Bailey 半岛                                                |  |                                                      | 1403±28                   | 锆石 SHRIMP U-Pb                     | 文中                      |

1399±20 Ma、1400~1340 Ma, 13 个碎屑锆石核部的和谐年龄峰值为 ca. 1346 Ma, 指示变沉积岩的原岩沉积时代为 ca. 1350 Ma (Morrissey et al., 2017b)。Morrissey et al. (2017b) 在 Clark 半岛侵入变沉积岩的正片麻岩中获得了 2 个不同的锆石结晶年龄: 1323±7 Ma 和 1315±6 Ma, 认为这代表了岩浆作用的年龄, 指示与  $M_1/D_1$  有关的岩浆作用发生在变沉积岩原岩沉积后非常短的时间内, 正片麻岩的结晶年龄 1315±6 Ma 即是变沉积岩的原岩最小沉积年龄。Morrissey et al. (2017a) 分析了 Mitchell 半岛变泥质岩中独居石的 LA-ICPMS U-Pb 年龄, 最老的独居石年龄 ca. 1320~1300 Ma 和代表  $M_1$  的和谐年龄 1305±7 Ma 约束了最小沉积年龄, 同时指示沉积后很快就发生了变质作用。实际上, Windmill 群岛 Clark 半岛的石榴黑云斜长片麻岩的淡色体中获得的早期  $M_1$  变质事件年龄 1342±21 Ma (Post, 2000) 与 Morrissey et al. (2017a, 2017b) 认为的变沉积岩的沉积时代 1350~1315 Ma 有矛盾, 因此, 笔者依据已有的同位素年龄资料认为变沉积岩的原岩沉积时代应在 1450~1350 Ma 期间。

### 5.3.3 中元古代中期 $M_1/D_1$ 及岩浆作用

Post (2000) 的研究显示该区正片麻岩及包含的镁铁质岩石在第一次的构造热事件 ( $M_1/D_1$ ) 期间发生了强烈的变形和变质,  $D_1$  变形作用被变沉积岩的黑云母、矽线石及镁铁质岩石的角闪石-黑云母确定的  $S_1$  组构记录,  $S_1$  的面理与深熔的淡色体一致指示变形和变质作用是同时发生的。Clark 半岛的变形前  $D_1$ -同变质  $M_1$  石榴黑云斜长片麻岩中淡色体新生长的自形锆石的 1342±21 Ma 年龄指示早期  $M_1$  高角闪岩相变质事件,  $M_1$  温压条件为温度 ca. 750 °C、ca. 0.4 GPa。Clark 半岛同变形  $D_1$  的黑云二长片麻岩侵入副片麻岩的锆石结晶年龄为 1315±6 Ma, 代表早期  $D_1$  的变形年龄, 指示  $M_1/D_1$  的发生在 1315±6 Ma 之前。Morrissey et al. (2017a) 对 Mitchell 半岛变泥质岩中独居石进行 LA-ICP MS 测年, 获得的  $M_1$  和谐年龄为 1305±7 Ma。此次研究的镁铁质片麻岩锆石增生边的变质年龄为 1318±34 Ma, 与该时期的变质作用时代一致, 是一期高级变质事件。结合以上信息可知, 该区  $M_1/D_1$  的时代为 1340~1305 Ma,  $M_1/D_1$  事件是区域性的, 也包括了壳源的岩浆活动, 如 Clark 半岛 1315±6 Ma 年龄的同变形  $D_1$  长英质正片麻岩

的侵入 (Morrissey et al., 2017a)。

Bailey 半岛 2 块含石榴子石花岗片麻岩样品和 1 块片麻状含石榴子石花岗岩的侵位年龄分别为 1247±13 Ma、1258±12 Ma、1242±13 Ma (Zhang et al., 2012)。Mitchell 半岛黑云母花岗岩的锆石结晶年龄为 1235±7 Ma (Morrissey et al., 2017b), 此次分析的淡色片麻岩的原岩侵位年龄为 1257±51 Ma, 与石榴子石花岗片麻岩侵位年龄一致, 一同指示该区在 1258~1235 Ma 期间存在花岗岩的岩浆活动。

### 5.3.4 中元古代中期 $M_2/D_2$ 及岩浆作用

该区在麻粒岩相条件下记录了两幕变形, 分别为  $D_{2a}$  和  $D_{2b}$ 。 $M_2$  的温压条件为温度 ca. 850~900 °C、压力 ca. 0.4~0.6 GPa, 早期阶段以变沉积岩中广泛发生石榴子石-堇青石的部分熔融体为特征。 $M_2$  开始后就发生  $D_{2a}$  变形作用, 形成早期  $M_2$  淡色体。在麻粒岩相期间 ( $M_2/D_2$ ) 少量的减压和温度的增加导致  $M_1$  石榴子石形成堇青石、斜长石和斜方辉石或者堇青石和斜方辉石反应边。在  $D_{2a}$  期间广泛的花岗岩熔体侵入并随后变形, 形成弱的  $S_{2a}$  组构, Bailey 半岛同变质-变形后  $D_2$ -同变质  $M_2$  的石榴黑云二长片麻岩中锆石年龄为 1214±10 Ma, 解释为  $D_{2a}$  变形作用和  $M_2$  变质作用开始的年龄, 其中的独居石年龄为 1171±13 Ma。Herring 岛石榴堇青紫苏黑云二长混合片麻岩的矿物组合为石榴子石-堇青石-斜方辉石-柱晶石-钾长石-斜长石-尖晶石-硅硼镁铝矿-黑云母-石英, 其中深熔残留体的锆石增生边 SHRIMP U-Pb 年龄为 1171±9 Ma, 解释为麻粒岩相  $M_2$  高级变质作用部分熔融的时代, 独居石年龄为 1142±7 Ma, 表明与  $M_2$  变质作用相关的 Windmill 群岛变沉积岩的广泛部分熔融发生在 ca. 1170~1140 Ma 期间。Clark 半岛的变形前  $D_1$ -同变质  $M_1$  石榴黑云斜长片麻岩中独居石 U-Pb 年龄为 1171±6 Ma, Clark 半岛同变形  $D_1$  的黑云二长片麻岩的独居石年龄为 1169±7 Ma, 显然, 不同岩石的独居石年龄指示  $M_2$  变质作用持续时期为 ca. 1170~1140 Ma (Post, 2000)。

Zhang et al. (2012) 报道的花岗片麻岩中锆石中也记录了锆石增生, 如 Bailey 半岛含石榴子石花岗片麻岩样品 33-1 中测点 10 的 U 含量高达  $3364 \times 10^{-6}$ , 其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为 1222±25 Ma, 可能代表着锆石变质重结晶的年龄; 样品 34-1 为片麻状含石榴子石花岗岩, 锆石具有核-边结构, 锆石增生

边测点 14 的 U 含量达  $1796 \times 10^{-6}$ , 其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1221 \pm 16$  Ma, 代表着变质事件的年龄。Morrissey et al. (2017a) 把 Mitchell 半岛和 Herring 岛变泥质岩中独居石的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  和谐年龄  $1177 \pm 4$  Ma 和  $1185 \pm 8$  Ma 解释为  $M_2$  的峰期年龄。Cameron 岛、Mitchell 半岛、Robinson 脊、Herring 岛的 4 个变沉积岩锆石的变质增生边的年龄分别为  $1325 \sim 1295$  Ma、 $1310 \sim 1180$  Ma、 $1310 \sim 1170$  Ma、 $1250 \sim 1200$  Ma, 指示该区变沉积岩的变质事件发生在  $1325 \sim 1170$  Ma 期间 (Morrissey et al., 2017b)。

此次报道的淡色片麻岩锆石增生边年龄为  $1197 \pm 26$  Ma, 与 Morrissey et al. (2017a) 获得的变泥质岩中独居石的年龄  $1177 \pm 4$  Ma 和  $1185 \pm 8$  Ma 在误差范围内基本一致, 与正片麻岩和淡色体的石榴子石-全岩 Sm-Nd 等时线年龄 ca. 1156 Ma 和 ca. 1137 Ma 年龄相比稍老 (Möller et al., 2002), 指示  $M_2$  麻粒岩相变质事件年龄为 ca. 1137 ~ 1197 Ma。

同时期 Windmill 群岛地区的 Ardery 紫苏花岗岩岩浆活动强烈, 该岩体不均一, 锆石年龄范围变化较大。Post (2000) 获得的 Bosner 岛 Ardery 紫苏花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $1163 \pm 7$  Ma, 该年龄比 Morrissey et al. (2017b) 报道的 Robinson 脊的 Ardery 紫苏花岗岩锆石结晶年龄  $1178 \pm 7$  Ma 年轻约 15 Ma, 又比 Zhang et al. (2012) 报道的 2 块 Robinson 脊紫苏花岗岩样品的侵位年龄  $1196 \pm 8$  Ma 和  $1205 \pm 13$  Ma 年轻约 33 Ma。由于 Ardery 紫苏花岗岩不是一个均一的地质体, 从颜色、颗粒大小和矿物组成等的不同可知它是多个侵入体的聚集体, 典型的 Ardery 紫苏花岗岩是粗粒的火成侵入体, Robinson 脊可见 Ardery 紫苏花岗岩侵入层状片麻岩和变沉积岩系, 不同采样地获得的不同年龄指示 Ardery 紫苏花岗岩岩浆活动可能为幕式侵位, 其侵位时间约在  $1200 \sim 1160$  Ma 期间, 持续约 40 Ma。

研究区麻粒岩相变质作用  $M_2$  晚期阶段伴随着强烈的岩浆活动, 如 Ford 岛同变质-变形后  $D_2$  含榴黑云母花岗岩, 侵入年龄为  $1173 \pm 9$  Ma; Ardery 紫苏花岗岩侵入年龄为  $1163 \pm 7$  Ma、 $1178 \pm 7$  Ma、 $1196 \pm 8$  Ma 和  $1205 \pm 13$  Ma。Ardery 紫苏花岗岩被认为是在 ca.  $960 \sim 1100$  °C、 $0.3 \sim 0.4$  GPa 的温压条件下结晶的 (Kilpatrick and Ellis, 1992)。麻粒岩和侵入的 Ardery 紫苏花岗岩年龄相似说明 Ardery

紫苏花岗岩可能是镁铁质下地壳熔融作用的产物, 是与麻粒岩相变质作用热事件有关的岩浆作用, 是岩浆侵位同变质形成的 (Morrissey et al., 2017a, 2017b)。

### 5.3.5 中元古代晚期细晶岩墙侵位

Robinson 脊的后  $D_3$  的晚期细晶岩墙穿切了 Ardery 紫苏花岗岩, 代表晚期岩浆活动, 其锆石结晶年龄  $1138 \pm 9$  Ma 指示着细晶岩墙的侵位时代 (Post, 2000), 与 Stark et al. (2018) 报道的位于 Windmill 群岛以西 400 km 处的 Bungler 丘陵中的岩墙侵位年龄 ca. 1140 Ma 一致, 认为侵位与镁铁质板底垫托并和高温变质作用晚期阶段的造山垮塌 (如热松弛) 有关。对 Windmill 群岛地区相似产出方位的橄榄辉长岩墙进行区域对比后, 提出主要的岩墙群 (范围约 400 km) 的侵位与地幔柱活动和不均一交代岩石圈的地幔相互作用有关。

### 5.3.6 寒武纪早期 Balaena 岛辉长岩侵位

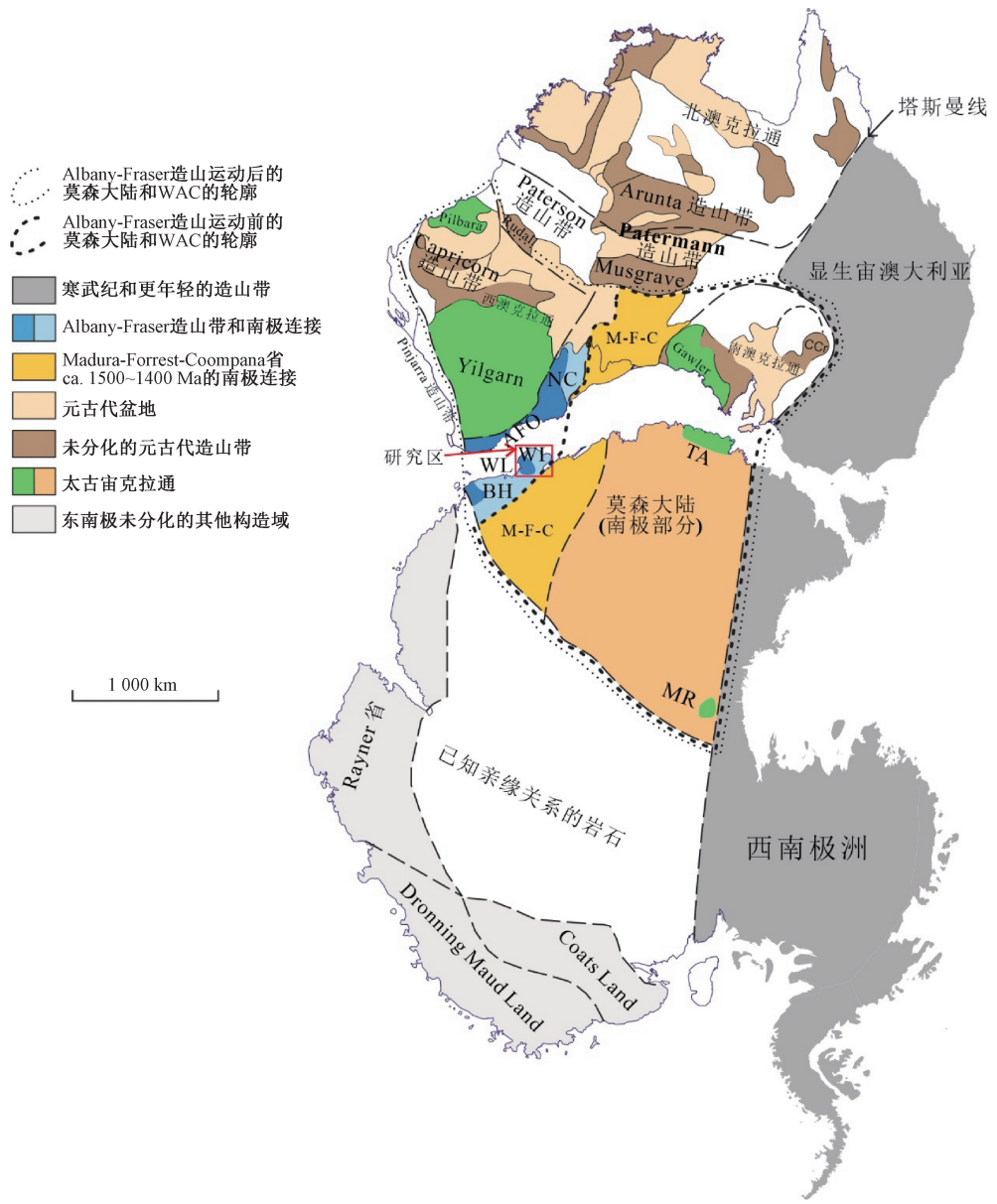
Balaena 岛辉长岩中斜长石 K-Ar 年龄为 ca. 519 Ma, 是该岩石泛非期热事件的记录 (Webb et al., 1963)。Windmill 群岛以西约 400 km 的 Bungler 丘陵存在泛非事件, 泛非热事件在 Windmill 群岛的影响值得进一步探究。

## 5.4 东南极 Windmill 群岛及邻区与西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带的关系

中元古代西澳大利亚的 Albany-Fraser 造山带记录有两个阶段的构造热事件: 第一阶段是 ca.  $1345 \sim 1260$  Ma 西澳大利亚和 Mawson 克拉通之间的初始碰撞; 第二阶段是 ca.  $1215 \sim 1140$  Ma 克拉通内活化和伸展 (Clark et al., 2000)。显然, 东南极 Windmill 群岛记录岩浆作用和变质作用的两个同位素年龄峰 (ca.  $1330 \sim 1260$  Ma 和  $1220 \sim 1140$  Ma) 在 Albany-Fraser 造山带东部的 Nornalup 带中也有记录 (Maritati et al., 2019; Spaggiari et al., 2011), 地球物理研究结果也揭示 Windmill 群岛基底与 Nornalup 带相连接 (Aitken et al., 2014, 2016; 图 7)。故 Windmill 群岛被认为是沿着走向延伸的 Albany-Fraser 造山带的一部分 (Paul et al., 1995; Post et al., 1997; Zhang et al., 2012; Morrissey et al., 2017 a, 2017b)。Morrissey et al. (2017b) 通过对 Windmill 群岛变沉积岩碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素数据分析认为该区变沉积原岩是在  $1350 \sim 1300$  Ma 期间沉积的, 而碎屑锆石年龄主要峰值为 ca.  $1800 \sim 1700$  Ma、ca. 1595 Ma 和 ca. 1380 Ma,

分别对应包括西澳克拉通、Musgrave 省和 Madura 省邻近地体的地质事件，Windmill 群岛位于西澳克拉通和 Madura 省之间，指示他们在沉积物沉积时相邻。Windmill 群岛的沉积岩变质后有 3 期，分别为 ca. 1325 ~ 1315 Ma、ca. 1250 ~ 1210 Ma 和 ca. 1200~1170 Ma 的岩浆岩侵入，其中第 2 和第 3 期的岩浆岩的 Hf 同位素特征指示有一定量的新生物质加入，与 Windmill 群岛相对薄的地壳特征一

致；沉积物沉积与其之后经历高热流梯度的变质作用之间的时间间隔较短，指示 Windmill 群岛可能形成于西澳克拉通延伸部分的弧后环境，揭示 Albany-Fraser 造山带向东边界是 ca. 1410~1350 Ma 的 Loongna 弧。与 Morrissey et al. (2017a, 2017b) 推测的沉积物沉积在弧后环境不同，Spaggiari and Smithies (2015) 认为沉积环境是弧前-前陆盆地被动边缘。



AFO—Albany-Fraser 造山带；BH—Bunger 丘陵；CCr—Curnamona 克拉通；M-F-C—Madura-Forrest-Coompana 省；MR—Miller Range；NC—Nornalup 杂岩；TA—Terre Adélie 克拉通；WAC—西澳克拉通；WI—Windmill 群岛；WL—威尔克斯地

图 7 南极洲和澳大利亚的冈瓦纳大陆构造图 (据 Liu et al. , 2018 修改)  
Fig. 7 Tectonic map of Antarctica and Australia in a Gondwana configuration (modified after Liu et al. , 2018)  
AFO—Albany-Fraser Orogen；BH—Bunger Hills；CCr—Curnamona Craton；M-F-C—Madura-Forrest-Coompana Provinces；MR—Miller Range；NC—Nornalup Complex；TA—Terre Adélie Craton；WAC—West Australian Craton；WI—Windmill Islands；WL—Wilkes Land

Windmill 群岛以西约 400 km 的 Bunger 丘陵于中元古代 ca. 1200~1170 Ma 存在幕式岩浆作用, 岩浆作用和 Windmill 群岛的中元古代原岩年龄一致 (1205~1196 Ma) (Post, 2000; Zhang et al., 2012; Tucker et al., 2020)。Tucker et al. (2018) 提出沿太古代澳大利亚和东南极克拉通的边缘伸长超过 2000 km 范围内存在区域上的中元古代高温变质作用记录, 即 Musgrave Inlier、Albany-Fraser 造山带、Windmill 群岛、High jump 群岛和 Bunger 丘陵等高级变质质地体 (图 7; Morrissey et al., 2017a)。这些地体指示中元古代时期 Bunger 丘陵-Windmill 群岛-Albany-Fraser 造山带连接为一个格林维尔造山带, 为罗迪尼亚超大陆拼合的重要组成部分。

## 6 结论

(1) 首次获得 Windmill 群岛 Bailey 半岛早期镁铁质片麻岩锆石的同位素年龄结果, 其锆石核部  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄  $1403\pm 28$  Ma, 代表原岩结晶年龄, 是 Windmill 群岛记录的最早岩浆事件, 可能与东部莫森大陆的构造岩浆活动相关。锆石增生边年龄  $1318\pm 34$  Ma, 记录了早期高级变质事件年龄, 对应于该区  $M_1$  高级变质事件。

(2) 淡色片麻岩核部年龄为 ca.  $1257\pm 51$  Ma, 记录与 Bailey 半岛含石榴子石花岗片麻岩同期的岩浆活动。其锆石增生边年龄为  $1197\pm 26$  Ma, 记录晚期  $M_2$  麻粒岩相变质事件。

(3) 上述年龄数据可为 1375~1151 Ma 期间东南极 Windmill 群岛与西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带相连接的构造模型提供年龄依据。

**致谢:** 感谢国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心在作者参加中国第 27 次、35 次南极考察期间提供的后勤支持。本文的写作得到了刘晓春研究员的鼓励, 审稿人张拴宏研究员、焦淑娟博士和编辑热心和认真耐心地对本文做了审阅并提出了很好的修改意见, 在此一并表示感谢。

## References

AITKEN A R A, BETTS P G, YOUNG D A, et al., 2016. The Australo-Antarctic Columbia to Gondwana transition [J]. *Gondwana Research*, 29 (1): 136-152.

AITKEN A R A, YOUNG D A, FERRACCIOLI F, et al., 2014. The subglacial geology of Wilkes land, East Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 41 (7): 2390-2400.

BLIGHT D F, OLIVER R L, 1977. The metamorphic geology of the

Windmill Islands, Antarctica: a preliminary account [J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 24 (5-6): 239-262.

BLIGHT D F, OLIVER R L, 1982. Aspects of the geologic history of the Windmill Islands, Antarctica [M] // CRADDOCK C. ed. *Antarctic geoscience*. Madison: University of Wisconsin Press: 445-454.

BOGER S D, 2011. Antarctica — Before and after Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 19 (2): 335-371.

CLARK D J, HENSEN B J, KINNY P D, 2000. Geochronological constraints for a two-stage history of the Albany-Fraser Orogen, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 102 (3-4): 155-183.

FITZSIMONS I C W, 2000. A review of tectonic events in the East Antarctic Shield and their implications for Gondwana and earlier supercontinents [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 31 (1): 3-23.

FITZSIMONS I C W, 2003. Proterozoic basement provinces of southern and southwestern Australia, and their correlation with Antarctica [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 206 (1): 93-130.

ARRIS L B, 1995. Correlation between the Albany, Fraser And Darling mobile belts of western Australia and Mirny to Windmill Islands in the east Antarctic Shield: Implications for Proterozoic Gondwanaland reconstructions [M] // YOSHIDA S M. *India and Antarctica during the Precambrian*. Memoir of the Geological Society of India, vol. 34. Bangalore: Geological Society of India: 47-71.

HAWKESWORTH C, CAWOOD P, KEMP T, et al., 2009. A matter of preservation [J]. *Science*, 323 (5910): 49-50.

HE X F, HAND M, SANTOSH M, et al., 2018. Long-lived metamorphic P-T-t evolution of the Highland Complex, Sri Lanka: insights from mafic granulites [J]. *Precambrian Research*, 316: 227-243.

HIRAYAMA E, TSUNOGAE T, MALAVIARACHCHI S P K, et al., 2020. Prolonged Neoproterozoic high-grade metamorphism of the Wannu Complex, Sri Lanka: New insights from petrology, phase equilibria modelling, and zircon U-Pb geochronology of partially melted cordierite gneiss from Walpita [J]. *Geological Journal*, 55 (9): 6147-6168.

KADOWAKI H, TSUNOGAE T, HE X F, et al., 2019. Pressure-temperature-time evolution of ultrahigh-temperature granulites from the Trivandrum Block, southern India: Implications for long-lived high-grade metamorphism [J]. *Geological Journal*, 54 (5): 3041-3059.

KILPATRICK J A, ELLIS D J, 1992. C-type magmas: igneous charnockites and their extrusive equivalents [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83 (1-2): 155-164.

KINNY P D, WIJBRANS J R, FROUDE D O, et al., 1990. Age constraints on the geological evolution of the Narryer Gneiss Complex, Western Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 37 (1): 51-69.

LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis [J]. *Precambrian Research*, 160 (1-2): 179-210.

LIU Y B, LI Z X, PISAREVSKY S A, et al., 2018. First Precambrian palaeomagnetic data from the Mawson Craton (East Antarctica) and tectonic implications [J]. *Scientific Reports*, 8: 16403.

LUDWIG K R. 2001. *Squid 1.02: A user's manual* [M]. *Bakeley Geochronology Center Special Publication*: 1-19.

MAAS R, KINNY P D, WILLIAMS I S, et al., 1992. The Earth's oldest known crust: a geochronological and geochemical study of 3900~4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (3): 1281-1300.

- MARITATI A, HALPIN J A, WHITTAKER J M, et al., 2019. Fingerprinting Proterozoic Bedrock in Interior Wilkes Land, East Antarctica [J]. *Scientific Reports*, 9: 10192.
- MÖLLER A, POST N J, HENSEN B J, 2002. Crustal residence history and garnet Sm-Nd ages of high-grade metamorphic rocks from the Windmill Islands area, East Antarctica [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 91 (6): 993-1004.
- MORRISSEY L J, HAND M, KELSEY D E, 2017a. A curious case of agreement between conventional thermobarometry and phase equilibria modelling in granulites: New constraints on *P-T* estimates in the Antarctica segment of the Musgrave-Albany-Fraser-Wilkes Orogen [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 35 (9): 1023-1050.
- MORRISSEY L J, PAYNE J L, HAND M, et al., 2017b. Linking the Windmill Islands, east Antarctica and the Albany-Fraser Orogen: insights from U-Pb zircon geochronology and Hf isotopes [J]. *Precambrian Research*, 293: 131-149.
- OLIVER R L, COOPER J A, TRUELOVE A J, 1983. Petrology and zircon geochronology of Herring Island and Commonwealth Bay and evidence for Gondwana reconstruction [C] //OLIVER R L, JAMES P R, JAGO J B. *Proceedings of the 4th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press: 64-68.
- PAUL E, STÜWE K, TEASDALE J, et al., 1995. Structural and metamorphic geology of the Windmill Islands, east Antarctica: field evidence for repeated tectonothermal activity [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42 (5): 453-469.
- PAYNE J L, HAND M, BAROVICH K M, et al., 2009. Correlations and reconstruction models for the 2500 ~ 1500 Ma evolution of the Mawson Continent [M] //REDDY S M, MAZUMDER R, EVANS D A D, et al., *Geological Society, London, Special Publications*, 323 (1): 319-355.
- POST N J, 2000. Unravelling Gondwana fragments: An integrated structural, isotopic and petrographic investigation of the Windmill Islands, East Antarctica [D]. Sydney: University of New South Wales.
- POST N J, HENSEN B J, KINNY P D, 1997. Two metamorphic episodes during a 1340 ~ 1180 Ma convergent tectonic event in the Windmill Islands, East Antarctica [M] //RICCI C A. *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*. Sienna: Terra Antarctica Publication: 157-161.
- SONG B, 2015. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation [J]. *Geological Bulletin of China*, 34 (10): 1777-1788. (in Chinese with English abstract)
- SPAGGIARI C V, KIRKLAND C L, PAWLEY M J, et al., 2011. The geology of the east Albany-Fraser Orogen: a field guide [M]. Perth: Geological Survey of Western Australia.
- SPAGGIARI C V, SMITHIES R H, 2015. Eucla basement stratigraphic drilling results release workshop: Extended abstracts [M]. Perth: Geological Survey of Western Australia.
- STARK J C, WANG X C, LI Z X, et al., 2018. In situ U-Pb geochronology and geochemistry of a 1.13 Ga mafic dyke suite at Bunger Hills, East Antarctica: The end of the Albany-Fraser Orogeny [J]. *Precambrian Research*, 310: 76-92.
- TUCKER N M, HAND M, CLARK C, 2020. The Bunger Hills: 60 years of geological and geophysical research [J]. *Antarctic Science*, 32 (2): 85-106.
- TUCKER N M, HAND M, KELSEY D E, et al., 2018. A tripartite approach to unearthing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunger Hills, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 314: 194-220.
- 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.
- WEBB A W, MCDOUGALL I, COOPER J A, 1963. Potassium-argon dates from the Vincennes Bay region and Oates Land [C] //ADIE R J. *Proceedings of the 1st international symposium on Antarctic geology*. North Holland, Amsterdam: 597-602.
- WILLIAMS I S, COMPSTON W, COLLERSON K D, et al. 1983. A reassessment of the age of the Windmill metamorphics, Casey area [C] //OLIVER R L, JAMES P R, JAGO J B. eds. *Antarctic earth science*, Australian Academy of Science, Canberra: 3-76.
- WHITNEY D L, EVANS B W, 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 95 (1): 185-187.
- WILLIAMS I S, 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [M] //MCKIBBEN M A, SHANKS W C III, RIDLEY W I. *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes*. Reviews in Economic Geology, 7: 1-35.
- WILLIAMS I S, 2001. Response of detrital zircon and monazite, and their U-Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48 (4): 557-580.
- WILLIAMS I S, BUICK I S, CARTWRIGHT I, 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 14 (1): 29-47.
- WILLIAMS I S, CLAESSESON S, 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97 (2): 205-217.
- XU Q Q, ZHAO L, NIU B G, 2015. Determination of the early Paleozoic granite in Zhifang area, East Junggar, Xinjiang and its geological implications [J]. *Journal of Geomechanics*, 21 (4): 502-516. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI M G, 2019. Tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (5): 722-745. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S H, ZHAO Y, LIU X C, et al., 2012. U-Pb geochronology and geochemistry of the bedrocks and moraine sediments from the Windmill Islands: implications for Proterozoic evolution of East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 206-207: 52-71.

## 附中文参考文献

- 宋彪, 2015. 用 SHRIMP 测定锆石 U-Pb 年龄的工作方法 [J]. *地质通报*, 34 (10): 1777-1788.
- 徐芹芹, 赵磊, 牛宝贵, 2015. 新疆东准噶尔纸房地区早古生代花岗岩的确定及其地质意义 [J]. *地质力学学报*, 21 (4): 502-516.
- 翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化 [J]. *地质力学学报*, 25 (5): 722-745.

## 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 可以听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

