第 27 卷第 5 期
2021 年 10 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 27 No. 5
Oct. 2021

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.065

文章编号：1006-6616（2021）05-0796-13

冈瓦纳大陆边缘罗斯运动的岩浆活动时代：来自北维多利亚地松散沉积物锆石年龄的证据

陈　虹[1,2,3]，王宏晖[1]，包国栋[1]
CHEN Hong[1,2,3], WANG Honghui[1], BAO Guodong[1]

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

CHEN H, WANG H H, BAO G D, et al., 2021. Detrital zircon age from the glacial and littoral deposit, Northern Victoria Land, Antarctica: Implications for the timing of magmatic activity of the Ross Orogeny on the Gondwana continental margin [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5): 796-808. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.065

Abstract: The Transantarctic Mountains across the central Antarctic continent are the Ross orogenic belt formed by westward subduction of the Paleo-Pacific underneath the East Gondwana active continent margin in the early Paleozoic. The sedimentary, deformation and metamorphism, and granitic magmatic intrusion in this stage represent the process of the Ross Orogeny. Due to the significant difference in age among the three elements mentioned above, there is no precise time defined on the Ross Orogeny. In this paper, detrital zircon U-Pb dating of gravel and sand samples from moraines and coastal sediments in the Inexpressible Island of Northern Victoria Land was carried out. The ages of four samples with different gravel diameters range from 2443 to 323 Ma and are mainly concentrated between 530～450 Ma, with a peak age of ～485 Ma. Most of the zircons show oscillatory zoning in CL images and have Th/U ratios great than 0.1 (mainly>0.4), with REE characteristics indicating a magmatic origin. Therefore, these ages reflect the timing of magmatic activity in the provenance of the loose sediment samples. The age composition of detrital zircons is consistent with the age of magmatic intrusion, intracontinental deformation and depositional stratigraphy in the surrounding areas, suggesting that the magmatic activity in the Northern Victoria Land and its surrounding areas might have lasted up to 450 Ma in the intracontinental deformation stage, which may represent the end time of the Ross Orogeny. These results provide a new constraint for the tectonic evolution of the Ross Orogeny on the Gondwana continental margin.

Key words: Ross Orogeny; detrital zircon; subglacial geology; Northern Victoria Land; Antarctica

摘　要：横穿南极大陆中部的横贯南极山脉是早古生代时期古太平洋向东冈瓦纳活动大陆边缘俯冲形成的罗斯造山带，该阶段的地层沉积、变形变质以及花岗质岩浆侵入代表了罗斯运动的演化过程。由于岩

基金项目：国家自然科学基金（41941004）；极地专项项目（CHINARE 2016-02-05）；中国地质调局地质调查项目（DD20160060）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41941004), the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation # Assessment Programs (Grant No. CHINARE 2016-02-05), and the Geological Investigation Project of China Geological Survey (Grant No. DD20160060)
第一作者简介：陈虹（1982—），男，副研究员，主要从事区域构造与大陆变形研究。E-mail：chhzxm8281@163.com
收稿日期：2021-06-13；**修回日期**：2021-08-31；**责任编辑**：范二平
引用格式：陈虹，王宏晖，包国栋，2021. 冈瓦纳大陆边缘罗斯造山运动的岩浆活动时代：来自北维多利亚地松散沉积物锆石年龄的证据[J]. 地质力学学报，27（5）：796-808. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.065

浆活动与沉积地层和变形变质在时代上存在明显差异，罗斯运动的时代仍缺乏精确的限定。通过采集北维多利亚地难言岛地区冰碛物和海岸沉积物中的松散砂砾石样品，并进行碎屑锆石 U-Pb 测年得出：4 件不同粒径的冰碛物和海岸沉积样品中的碎屑锆石年龄峰谱具有单一峰谱的特征，年龄区间为 2443~323 Ma，主要集中于 530~450 Ma 之间，峰值年龄约为 485 Ma；锆石 Th/U 比值均大于 0.1，而且以>0.4 为主，其 CL 图像也具有明显的振荡环带，稀土元素特征主体具有岩浆锆石的特征，反映了样品物源区岩浆活动的时代特征。碎屑锆石年龄组成与周缘地区岩浆活动和陆内变形以及沉积地层时代基本一致，表明北维多利亚地及其周缘地区在罗斯运动晚期陆内变形阶段的岩浆活动应持续至 450 Ma，这可能代表了罗斯运动结束的时代，该结果为冈瓦纳大陆边缘罗斯运动的构造演化过程提供了新的约束。

关键词： 罗斯运动；碎屑锆石；冰下地质；北维多利亚地；南极

中图分类号： P597.3 **文献标识码：** A

0 引言

南极大陆由西南极、东南极以及中部的横贯南极山脉等三部分组成（Boger，2011）。其中横贯南极山脉在经历了尼姆诺德（Nimrod）和罗斯（Ross）运动之后，结束了洋盆发展史，进入陆内造山阶段，形成了罗斯造山带（Farabee et al.，1990；Goodge et al.，2001；Boger and Miller，2004；Elliot and Fanning，2008；Federico et al.，2010；Palmeri et al.，2012；Estrada et al.，2016）。该造山带与澳大利亚东南部的德拉美（Delamerian）造山带相连，形成了罗斯-德拉美造山带（Estrada et al.，2016；Glen and Cooper，2021）。罗斯-德拉美造山带的形成以及罗斯运动代表了古生代时期冈瓦纳古陆最终形成的过程（Goodge et al.，2001；Federico et al.，2009）。

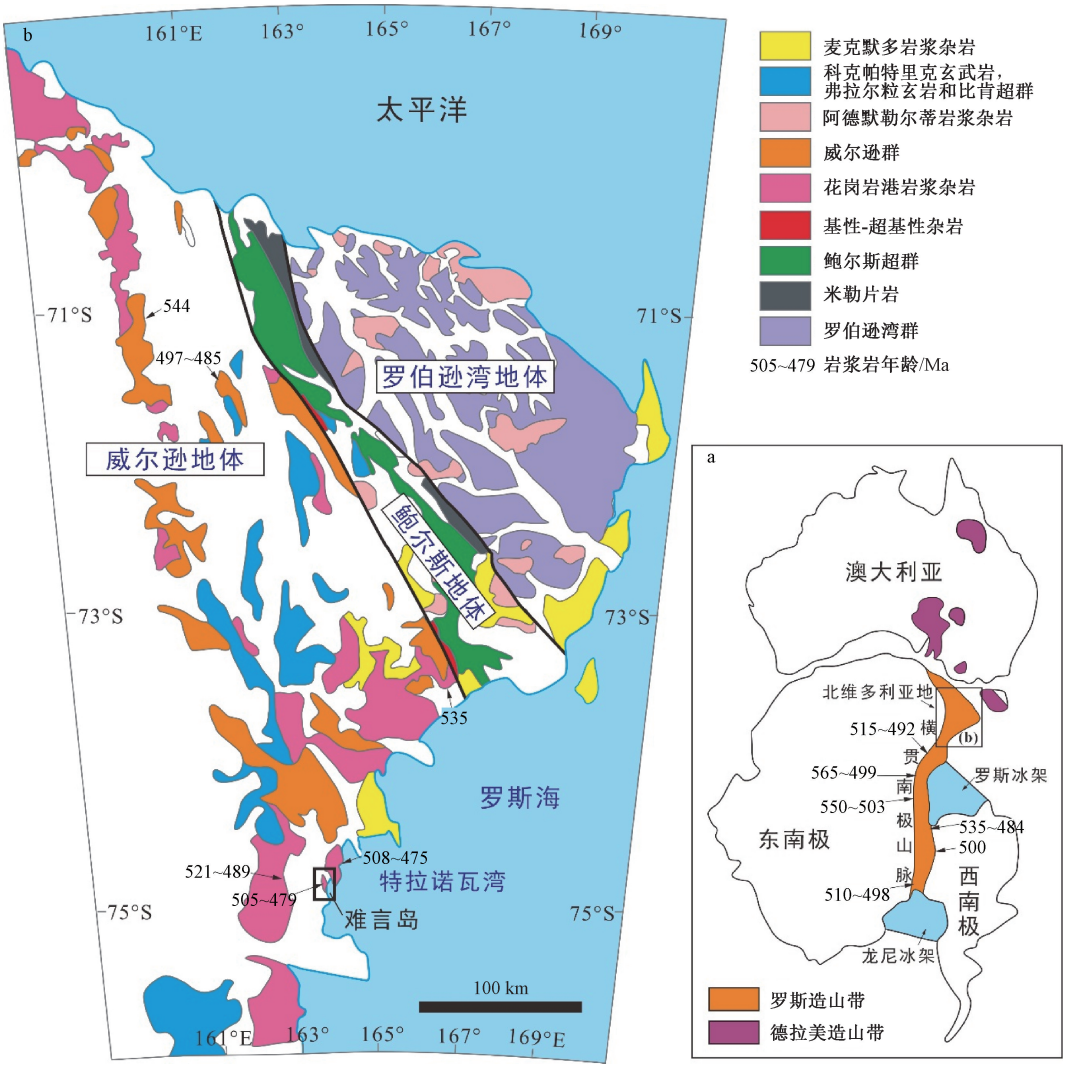
罗斯运动造成罗斯-德拉美造山带内罗斯超群（Ross Supergroup）的变形和变质，同时还伴随有大规模寒武纪—奥陶纪花岗质岩浆的侵入（Stump，1995；Giacomini et al.，2007；Federico et al.，2009，2010；Di Vincenzo et al.，2016；Hagen-Peter and Cottle，2016；Paulsen et al.，2016；Chen et al.，2019）。对比罗斯超群中碎屑锆石、岩浆岩和冷却年龄发现，罗斯造山带内岩浆活动明显早于沉积地层和变形变质的时代（Estrada et al.，2016；Paulsen et al.，2016；Glen and Cooper，2021）。其中，花岗质岩浆活动的时代主要为 550~480 Ma（Giacomini et al.，2007；Federico et al.，2009；Hagen-Peter and Cottle，2016），而变形变质的时代主要为 480~460 Ma（Di Vincenzo et al.，997，2001，2014），在维多利亚地（Victoria Land）等地区的变质沉积岩中还获得了少量 460~440 Ma 年轻碎屑锆石年龄（Paulsen et al.，2015，2016；Estrada et al.，2016），这些较年轻的年龄被认为与最年轻花岗岩类侵入后的韧性剪切变形有关（Di Vincenzo et al.，2007，2013；Rossetti et al.，2011）。上述不同地质体的时代差异，造成罗斯运动的时限缺乏准确限定，对于冈瓦纳大陆边缘罗斯运动结束的时代也缺乏更加精确的限定（Estrada et al.，2016）。

通过大量关于维多利亚地北部沉积岩中碎屑锆石年龄组成的研究，基本确定了罗斯超群的沉积时代和物源特征，其中寒武纪碎屑锆石与罗斯造山带内岩浆岩体的年龄一致，反映了古太平洋板块俯冲阶段的岩浆活动；而奥陶纪碎屑锆石年龄是否也与罗斯运动有关，则缺乏详细的锆石成因和物源对比分析（Elliot and Fanning，2008；Paulsen et al.，2015，2016；Estrada et al.，2016）。而且通过 U/Th>20 和锆石 CL 图像等特征统计发现存在变质继承锆石与岩浆锆石重叠的特征，进一步增加了以碎屑锆石年龄来解释罗斯造山带内岩浆锆石年龄组成和岩浆演化过程研究的难度（Paulsen et al.，2016），也无法对罗斯造山带内岩浆演化过程提供更加精确的限定。所以，研究奥陶纪碎屑锆石年龄的特征，对于限定罗斯运动的时限具有重要意义。由于冰雪和冰碛物覆盖的影响，很难全面获取罗斯造山带内基底岩石的物质组成信息，但是通过大陆边缘松散堆积物的碎屑锆石年龄分析，能够获得更多罗斯造山带内岩浆演化的时代信息。文章依托罗斯海新建站选址工作，在北维多利亚地难言岛地区采集了冰碛物和海岸沉积物中的松散砂砾石样品，并开展碎屑锆石 U-Pb 测年，以获得该地区罗斯运动时期岩浆活动的年龄组成特征，为认识横贯南极山脉地区罗

斯运动的演化过程提供新的依据。

1 地质背景

横贯南极山脉是一个早古生代造山带，又称罗斯造山带（图 1a），其地层由基底和盖层两大部分组成（Talarico et al.，1995；Talarico and Castelli，1995；Boger and Miller，2004；Giacomini et al.，2007；Paulsen et al.，2007）。罗斯造山带是一条横跨南极洲约 3500 km、沿横贯南极山脉出露的变形变质沉积岩和花岗质岩带，代表了冈瓦纳大陆古太平洋边缘上发育的新元古代—早古生代与俯冲相关的增生造山带（图 1a；Estrada et al.，2016；Glen and Cooper，2021）。



a—罗斯-德拉美造山带构造格架与岩浆年龄分布特征；b—北维多利亚地构造特征与岩浆年龄特征

图 1 罗斯造山带与北维多利亚地地质简图（据 Estrada et al.，2016；Chen et al.，2019 修改）

Fig. 1 Geological map of the Ross Orogen and Northern Victoria Land (modified after Estrada et al.，2016；Chen et al.，2019) (a) Tectonic framework of the Ross-Delamerian orogenic belt and the magmatic age distribution in it；(b) Tectonic features and magmatic age in Northern Victoria Land

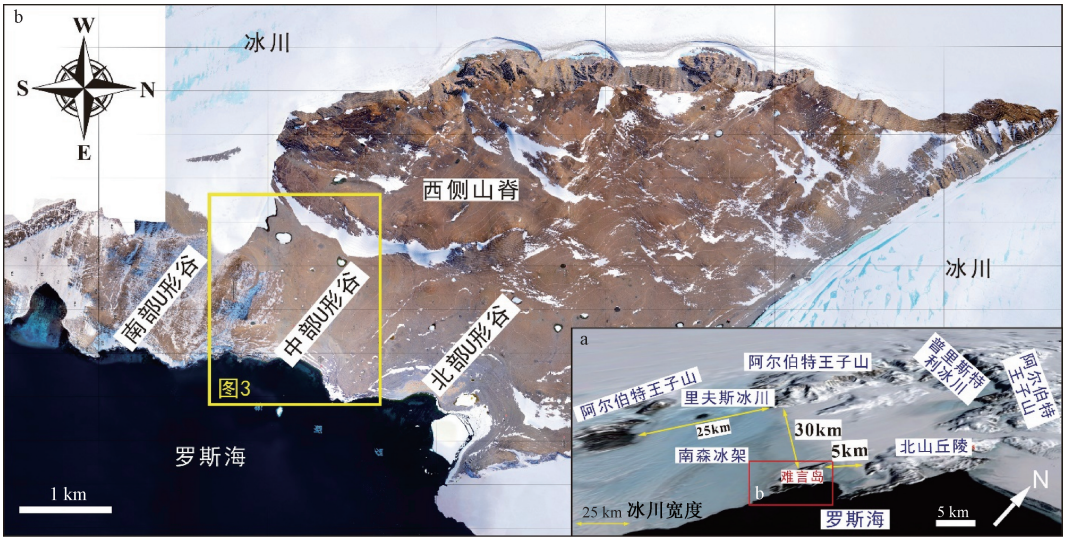
横贯南极山脉的基底是由元古宇及下古生界两个构造层所组成，称之为双构造层基底，盖层则由上古生界及更年轻地层组成，不整合覆盖于基底岩系之上（陈廷愚等，2008）。双构造层基底的形成经历过两次较重要的构造运动，其一发生于晚前寒武纪距今大约 1000～630 Ma 之间，即尼姆诺德或比得莫尔（Beardmore）运动（Craddock，1970）；其二发生于早古生代奥陶纪，即罗斯运动（Giacomini et al.，2007）。罗斯运动一词最早是指发生于罗斯超群中的褶皱和变质作用（Gunn and

Warren, 1962)，随着研究的深入，罗斯运动逐渐被认为是发生于横贯南极山脉地区早古生代地层中的变形和变质作用，以及伴生的大规模寒武纪—奥陶纪花岗质岩浆的侵入活动（Stump, 1995; Giacomini et al., 2007; Federico et al., 2009, 2010; Di Vincenzo et al., 2016; Hagen-Peter and Cottle, 2016; Paulsen et al., 2016; Chen et al., 2019）。罗斯运动结束了横贯南极山脉地区的洋盆发展史，开始了横贯南极山脉陆内造山与隆升的发育过程（Stump and Fitzgerald, 1992）。

北维多利亚地（Northern Victoria Land）位于横贯南极山脉靠近罗斯海的区域（图 1），罗斯运动在该区形成了大量的早古生代岩浆岩（Rocchi et al., 1998; Di Vincenzo and Rocchi, 1999; Giacomini et al., 2007; Hagen-Peter and Cottle, 2016）。这些花岗岩分布范围广泛，从北维多利亚地经中横贯南极山脉直到毛德王后山（Queen Maud Mountains）和霍利克山（Horlick Mountains）均有大量出露（Rocchi et al., 1998, 2015; Giacomini et al., 2007; Paulsen et al., 2007; Hagen-Peter and Cottle, 2016），其中最典型的代表为麦克默多海峡（McMurdo Sound）东南侧的花岗岩港侵入体（Granite Harbor Intrusives）和北维多利亚地的特拉诺瓦（Terra Nova）杂岩体（Rocchi et al., 1998）。花岗岩港侵入体的岩石组成为花岗岩、花岗闪长岩及英云闪长岩，其锆石 U-Pb 年龄为 544~481 Ma 之间（Black and Sheraton, 1990; Bracciali, et al., 2009; Rocchi et al., 2011）。特拉诺瓦杂岩体岩浆活动时代为 510~475 Ma（Giacomini et al., 2007; 王伟等, 2014; Chen et al., 2019），与花岗岩港侵入体和其他地区花岗岩的侵入时代基本一致，例如南维多利亚地（Southern Victoria Land）莱特山谷（Wright Valley）中的忒修斯花岗闪长岩（Theseus granodiorite）（Hagen-Peter and Cottle, 2016），伊丽莎白女王地（Queen Elizabeth Land）东段米勒岭（Miller Range）的希望花岗岩（Hope granite）（Paulsen et al., 2013），都反映了冈瓦纳大陆及罗斯造山带形成的过程（Rocchi et al., 1998; Di Vincenzo and Rocchi, 1999; Federico et al., 2009; Chen et al., 2019）。岩浆活动及后期陆内演化过程导致了地壳大面积的隆升与剥蚀，形成了不整合覆盖于寒武纪地层之上的陆相砾岩和砂岩地层，其上又被上泥盆统—三叠系的比肯超群（Beacon Supergroup）不整合或假整合覆盖（Elliot and Fanning, 2008）。

北维多利亚地罗斯超群总体由威尔逊地体（Wilson Terrane）、鲍尔斯地体（Bowers Terrane）和罗伯逊湾地体（Robertson Bay Terrane）三部分组成（图 1b），不同地体之间为断层接触，其岩石组成、变形变质特征差异明显（Weaver et al., 1984; Sheraton et al., 1987; Capponi et al., 1999; Goodge et al., 2001; Federico et al., 2010; Paulsen et al., 2016）。威尔逊地体中的新元古代威尔逊群主要由角闪岩、片麻岩及片岩等低级—高级变质沉积岩组成；鲍尔斯地体中的寒武纪—奥陶纪鲍尔斯超群主要由玄武岩、砂岩、泥岩及灰岩等低级变质岛弧性火山沉积岩组成；罗伯逊湾地体中的寒武纪—早奥陶世罗伯逊湾群主要由杂砂岩和泥岩等低级变质浊积岩组成（图 1; Estrada et al., 2016）。以花岗岩港侵入体为代表的晚寒武世—奥陶纪花岗岩仅发育于威尔逊地体；而以阿德默勒尔蒂侵入体（Admiralty Intrusion）为代表的泥盆纪花岗岩仅发育于罗伯逊湾地体和鲍尔斯地体（图 1; Estrada et al., 2016）。罗伯逊湾地体和鲍尔斯地体与威尔逊地体之间具有完全不同的地质演化史，因此罗伯逊湾地体和鲍尔斯地体被认为是寒武纪之后才拼贴到东南极大陆威尔逊地体之上的外来岩块（Federico et al., 2010）。三个地体在罗斯运动期间均发生了褶皱隆升，说明它们在早奥陶世时已经开始拼合，同时泥盆纪—石炭纪阿德默勒尔蒂侵入体的广泛发育表明它们是在泥盆纪—石炭纪才最终拼合、碰撞在一起的，从而转入陆内构造演化阶段（陈廷愚等, 2008）。

难言岛（Inexpressible Island）位于东南极大陆罗斯海与维多利亚地交接处的特拉诺瓦湾（Terra Nova Bay）南部的岛上，地理坐标为南纬 74°50′—74°57′；东经 163°35′—163°46′。岛屿陆地面积约为 50 km^2，总体呈南北走向的菱形。该岛的北侧为普利斯特利冰川（Priestley Glacier），西侧和南侧为南森冰架（Nansen Ice Sheet），东侧毗邻罗斯海的特拉诺瓦湾（图 2）。在该岛上出露的主要岩石组成为淡色花岗岩、闪长岩、变质花岗岩和其他花岗岩（Di Vincenzo and Rocchi, 1999; Chen et al., 2019）。最新研究表明，其他花岗岩的主要岩石类型为二长岩，并有少量二长闪长岩，其侵入时间为 486~479 Ma，均为早奥陶世早期（图 3; Chen et al., 2019）。



a—难言岛周边地区地貌特征；b—难言岛综合地貌特征

图 2 难言岛及周边地区综合地貌图（航空正射影像图由黑龙江测绘地理信息局极地测绘工程中心提供）

Fig. 2 The location and geomorphological map of the Inexpressible Island and its surrounding areas (The aerial orthophoto map was provided by the Polar Mapping Engineering Center of Heilongjiang Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information) (a) Geomorphological features around the Inexpressible Island; (b) Geomorphological features of the Inexpressible Island

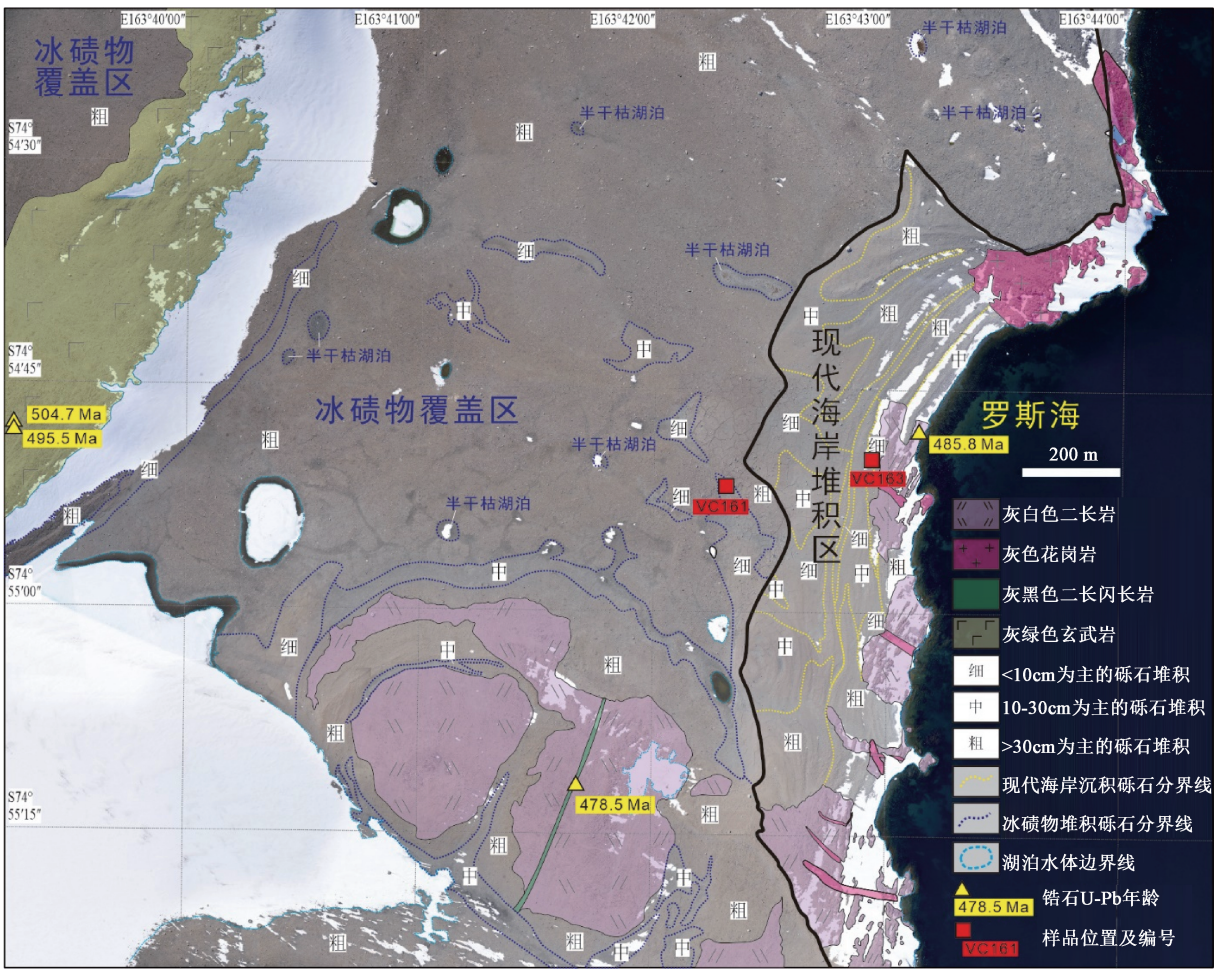


图 3 难言岛中部 U 形谷地区基岩和松散堆积物地质特征

Fig. 3 Geological characteristics of the bedrocks and Quaternary deposits in the middle U-shaped valley area of the Inexpressible Island

2　难言岛地区地貌特征与松散层覆盖特征

难言岛总体呈现了西高东低的地貌特征，其西侧为一条近南北向的山脊，最高海拔达到 370.2 m。其东部则由多个北西—南东走向的凹谷组成，由北向南主体发育三个 U 形谷（图 2）。北部 U 形谷总体呈斜坡状，由南东向北西逐渐增高；中部 U 形谷总体较平坦，平均海拔在 10 m 左右，仅在靠近东部海岸线附近存在高差约 5 m 的堆积垄；南部 U 形谷总体较平坦，平均海拔在 40 m 左右，仅在靠近海岸线位置变陡。

研究区主要位于难言岛中部 U 形谷分布范围内。该地区总体呈西高东低，西侧有一个南北走向的山脊，东侧为平地和海岸地貌（图 3）。U 形谷内总体海拔高度 8~20 m，区域内高差在 15 m 之内，谷底和西侧山脊高差约为 110 m。

野外地质调查显示，难言岛内基岩主要出露在西侧山脊和东部沿海岸线地区，以及部分较高山丘顶部位置，出露岩石主要为二长岩和花岗岩脉，局部出露有闪长岩脉和玄武岩（图 3）。

难言岛大部分地区均被松散堆积物覆盖，包括冰碛物和现代海岸堆积，并以冰碛物堆积覆盖为主（图 3）。冰碛物分布受后期沉积影响，可以划分为冰湖堆积和不同粒径的冰碛物堆积（图 3）。冰碛物堆积区内砾石粒径较大，冰碛物呈尖棱状，无磨圆，无分选（图 4a）。砾石成分复杂，岩性有花岗岩、片麻岩、二长岩、石英岩、玄武岩等。砾石大小混杂，总体以大于 50 cm 的砾石为主。局部低洼处出露有粒径较小的砾石，其大小以<10 cm 为主，而且表面盐碱明显，代表了早期干旱—半干旱冰湖沉积的底部（图 4b）。冰碛物覆盖区内均发育有典型六边形或网格状的冻胀纹（图 4c），而且在裂纹交汇处往往形成巨型砾石的堆积（图 4d）。在南部基岩区二长岩表面发育有冰川擦痕，其倾伏向为南东向，倾伏角约 30°（图 4e），表明该地区曾经历了由北西往南东方向运动的冰川作用，这与现今 U 形谷走向和冰川流动的方向一致（图 2）。

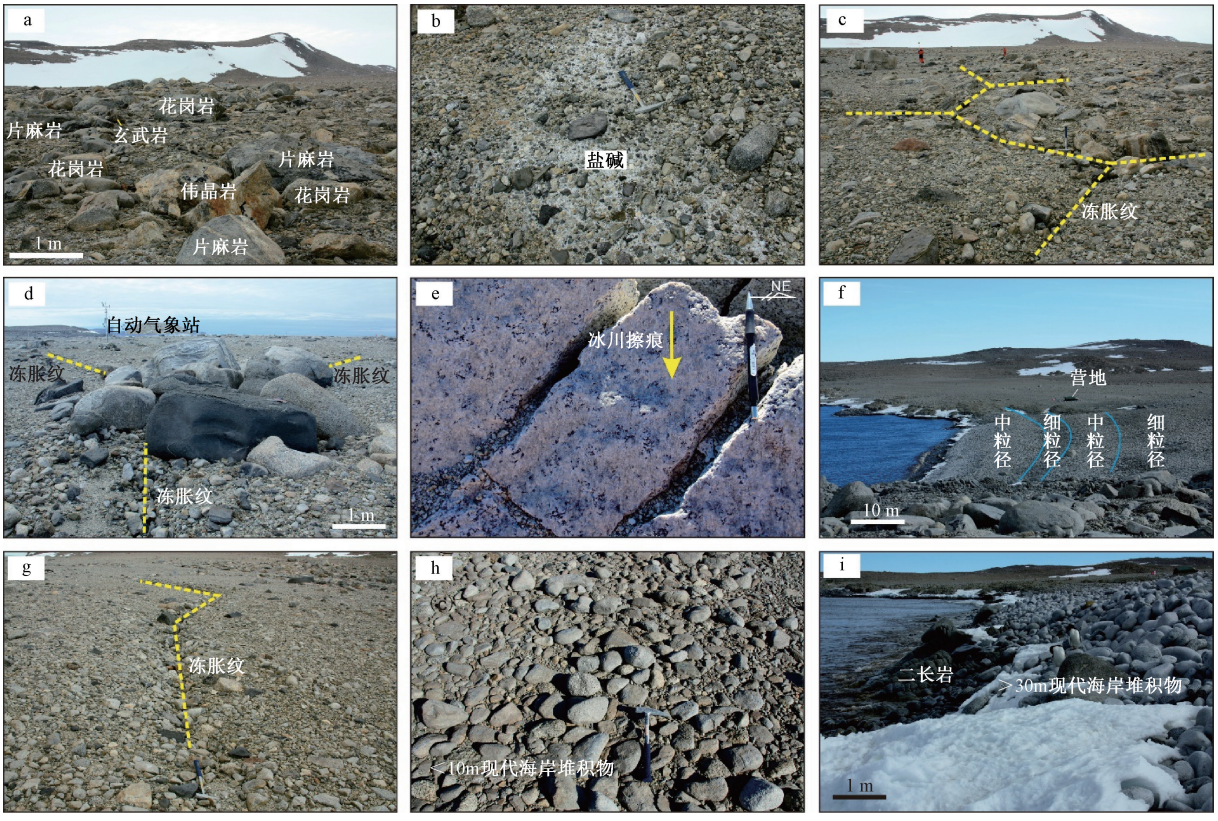


图 4　难言岛地区松散堆积物砾石组成与结构特征

Fig. 4　Gravel composition and structural characteristics of Quaternary deposits in the Inexpressible Island

在难言岛东部沿海岸线还堆积有不同粒径的砾石，这种砾石有一定的磨圆和分选，与冰碛物特征差

异明显，而且其延伸方向明显沿现代海岸线，反映了受到海水冲刷的特征，代表了现代海岸堆积（图 3，图 4f）。通过野外实地考察发现，砾石成分在东西横剖面上的变化较大。剖面西部砾石以多种岩性的混杂堆积为主，包括花岗岩、二长岩、片麻岩和玄武岩等岩性，砾石磨圆和分选较差，粒径以 10~30 cm 为主，而且表面发育大量裂纹，裂纹宽度、深度和延伸长度不均一（图 4g）；中部以花岗岩为主，分选较好，磨圆一般，砾石多以<10 cm 砾石为主（图 4h）；而在东部沿海岸线区域，砾石多为二长岩和花岗岩，砾石分选和磨圆均较好，而且砾石多以>30 cm 为主，尤其在靠近现代海岸线地区，砾石的分选和磨圆均极好，显示了强烈海水侵蚀的特征（图 4i）。中东部地区砾石层覆盖厚度较薄，一般以<0.5 m 为主，下伏为二长岩或花岗岩的基岩（图 4i）。

3 样品采集与测试方法

为了对比分析难言岛松散堆积物中冰碛物和海岸堆积物的物源特征，在细颗粒的冰碛物和海岸堆积物中分别筛选了 5~12 目（直径 1400~4000 μm）和>12 目（直径<1400 μm）两种粒径的砾石样品开展碎屑锆石分析，样品位置见图 3，具体样品信息见表 1。

表 1 难言岛表层松散物碎屑锆石样品及年龄特征

Table 1 Detrital zircon samples and their age characteristics of surface Quaternary deposits in the Inexpressible Island

序号	样品编号	经纬度	沉积类型	砂样粒径（目/μm）	测点数量（谐和度>90%/全部测点）	最小/最大年龄值/Ma	其他年龄峰值/Ma
1	VC 161/1	S74°54′51.3″；E163°42′18.3″	冰碛物	5~12/1400~4000	58/60	323/2440	~494
2	VC 161/2	S74°54′51.3″；E163°42′18.3″	冰碛物	>12/<1400	56/60	421/517	~474
3	VC 163/1	S74°54′49.1″；E163°42′57.0″	海岸堆积	5~12/1400~4000	57/60	414/568	~476
4	VC 163/2	S74°54′49.1″；E163°42′57.0″	海岸堆积	>12/<1400	60/60	458/2443	~489

所采集样品的沉积物中的碎屑锆石在廊坊河北省区域地质矿产调查研究所实验室利用标准技术进行分选，锆石制靶后，进行了锆石阴极发光、反射光以及透射光照像，以观察锆石的内部结构，锆石 U-Pb 年龄在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 方法测定，分析用的激光剥蚀系统为 GeoLasHd，等离子体质谱仪为 Agilent7900。激光能量 80 mJ，频率 5 Hz，激光束斑直径为 32 μm（Liu et al.，2008，2010），NIST610 作为微量元素校正标准样品，91500 作为同位素比值校正标准样品，GJ-1 为同位素比值监控标准样品。锆石测定点的 U-Pb 表面年龄采用 ICPMSDATACAL10.8 软件进行处理。用 Anderson 等方法对普通 Pb 进行校正（Anderson，2002），并采用 ISOPLOT 程序进行锆石谐和图和相对概率分布图的绘制（Ludwig，2003）。用$^{206}Pb/^{238}U$ 和$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄来分别代表<1000 Ma 和>1000 Ma 锆石年龄。同时对锆石中稀土元素进行采集，用于分析锆石的成因类型。具体测试结果数据可扫描文后 OSID 码进行查看。

4 测试结果

选择上述 4 件样品进行碎屑锆石的年代学分析，每件样品挑选 60 颗锆石颗粒进行 U-Pb 测年分析（图 5）。

样品 VC161-1 是冰碛物中 5~12 目（直径 1400~4000 μm）的砾石，总共测试了 60 颗锆石，仅有 2 个点的谐和度<90%。锆石颗粒一般为 100~150 μm，通常具有棱角到次棱角形的形状，具有明显的自形特征，锆石内部振荡环带明显（图 5a）。所有锆石测点的 Th/U 比值为 0.16~1.16，平均值为 0.67，其中比值大于 0.4 的锆石有 52 颗。对于谐和度>90%的 58 个锆石测点，其年龄值主要分布在 550~323 Ma 之间，峰值年龄区间为 500~480 Ma，峰值年龄约为 494 Ma，另外还有一颗锆石的年龄为 2440 Ma（图 6a）。

样品 VC161-2 是冰碛物中>12 目（直径<1400 μm）的砾石，总共测试了 60 颗锆石，仅有 4 个点的谐和度<90%。锆石颗粒一般为 100~150 μm，通常具有棱角到次棱角形的形状，具有明显的自形特征，锆石内部振荡环带明显（图 5b）。所有测点的 Th/U 比值为 0.24~1.36，平均值为 0.67，其中比值大于 0.4 的锆石有 53 颗。对于谐和度>90%的 56 个锆石测点，其年龄值主要分布在 517~421 Ma 之间，峰值年龄区间为 480~460 Ma，峰值年龄约为 474 Ma（图 6b）。

样品 VC163-1 是海岸堆积物中 5~12 目（直径 1400~4000 μm）的砾石，总共测试了 60 颗锆石，

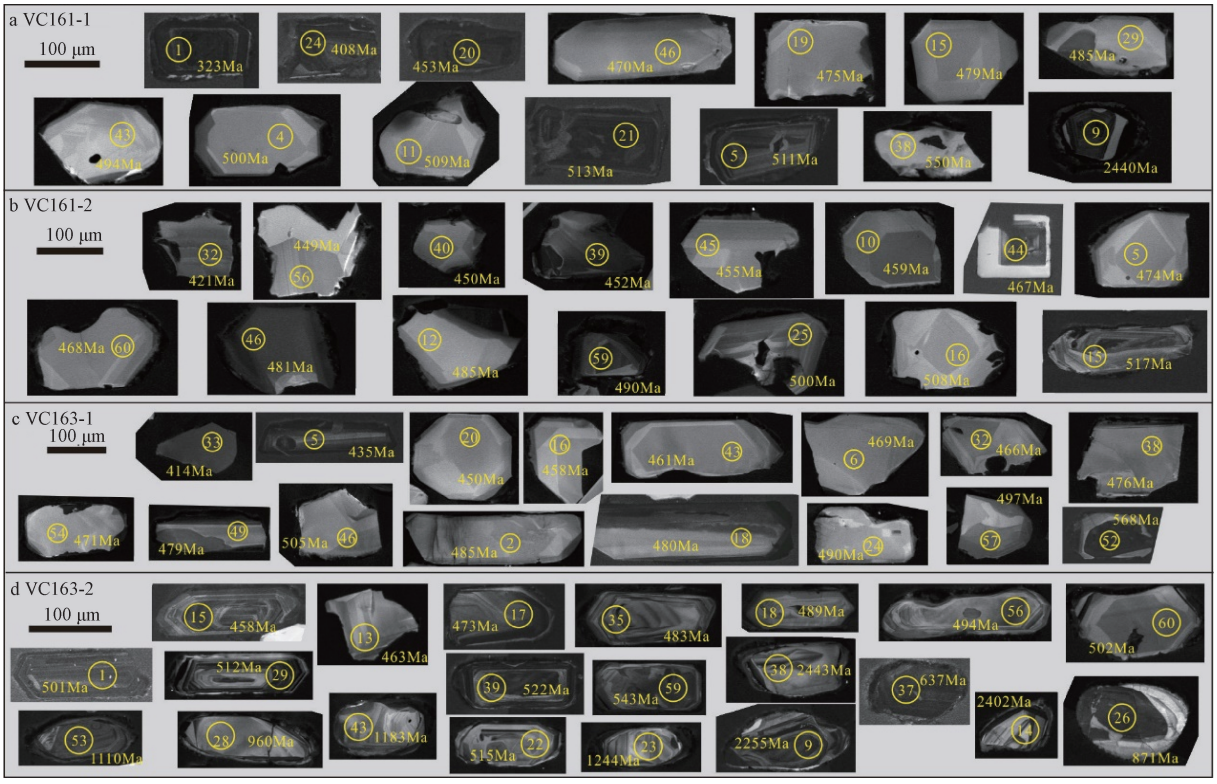


图 5　典型碎屑锆石 CL 图像及其 U-Pb 年龄

Fig. 5　Cathodoluminescenc images of typical detrital zircons and their U-Pb ages

仅有 3 个测点的谐和度<90%。锆石颗粒一般为 150~200 μm，以次棱角状—次圆形为主，具有明显的自形特征，少数锆石颗粒具有锆石内部振荡环带明显（图 5c）。全部测点的 Th/U 比值为 0.28~5.37，平均值为 0.77，其中比值大于 0.4 的锆石有 52 颗。对于谐和度>90%的 57 个锆石测点，其年龄值主要分布在 568~414 Ma 之间，峰值年龄区间为 480~460 Ma，峰值年龄约为 476 Ma（图 6c）。

样品 VC163-2 是海岸堆积物中>12 目（直径<1400 μm）的砾石，总共测试了 60 颗锆石，所有测点的谐和度均>90%。锆石颗粒一般为 100~200 μm，以次棱角状—次圆形为主，锆石颗粒内部振荡环带明显，部分锆石发育明显的次生边（图 5d）。所测锆石的 Th/U 比值为 0.09~1.46，平均值为 0.57，其中比值小于 0.1 的锆石仅 1 颗（测点 46），而大于 0.4 的锆石有 42 颗。锆石年龄值主要分布在 960~458 Ma 之间，峰值年龄区间为 500~480 Ma，峰值年龄约为 489 Ma，另外还有 7 颗锆石的年龄值>1000 Ma，最大年龄为 2443 Ma（图 6d），年龄大于 1000 Ma 的锆石具有明显核幔结构，显示了继承锆石的特征（图 5d）。

通过对 4 件样品的碎屑锆石年龄峰谱的对比发现，其年龄峰谱分布大体相似，具有单一峰谱的特征，主要集中于 530~450 Ma 之间，峰值年龄约为 485 Ma（图 6e）。另外在冰碛物中 5~12 目（直径 1400~4000 μm）和海岸堆积物中大于 12 目（直径<1400 μm）砾石中发育有少量>600 Ma 的锆石年龄，均以具有次生边的继承锆石为特征（图 5）。

5　讨论

新元古代—早古生代时期与俯冲有关的罗斯造山带是冈瓦纳大陆古太平洋边缘罗斯-德拉美俯冲增生带的一部分（Estrada et al.，2016；Paulsen et al.，2016）。罗斯造山带内的岩浆岩的组成和时代对认识冈瓦纳大陆最终形成以及东南极的冰下地质信息具有重要意义。

5.1　碎屑锆石成因分析

早期通过北维多利亚地沉积岩中碎屑锆石的年龄组成研究显示，碎屑锆石中含有大量变质继承锆石，如反映元古代时期格林维尔运动的构造活动（Estrada et al.，2016；Paulsen et al.，2016）。因此，准确判别碎屑锆石的成因，对于分析碎屑

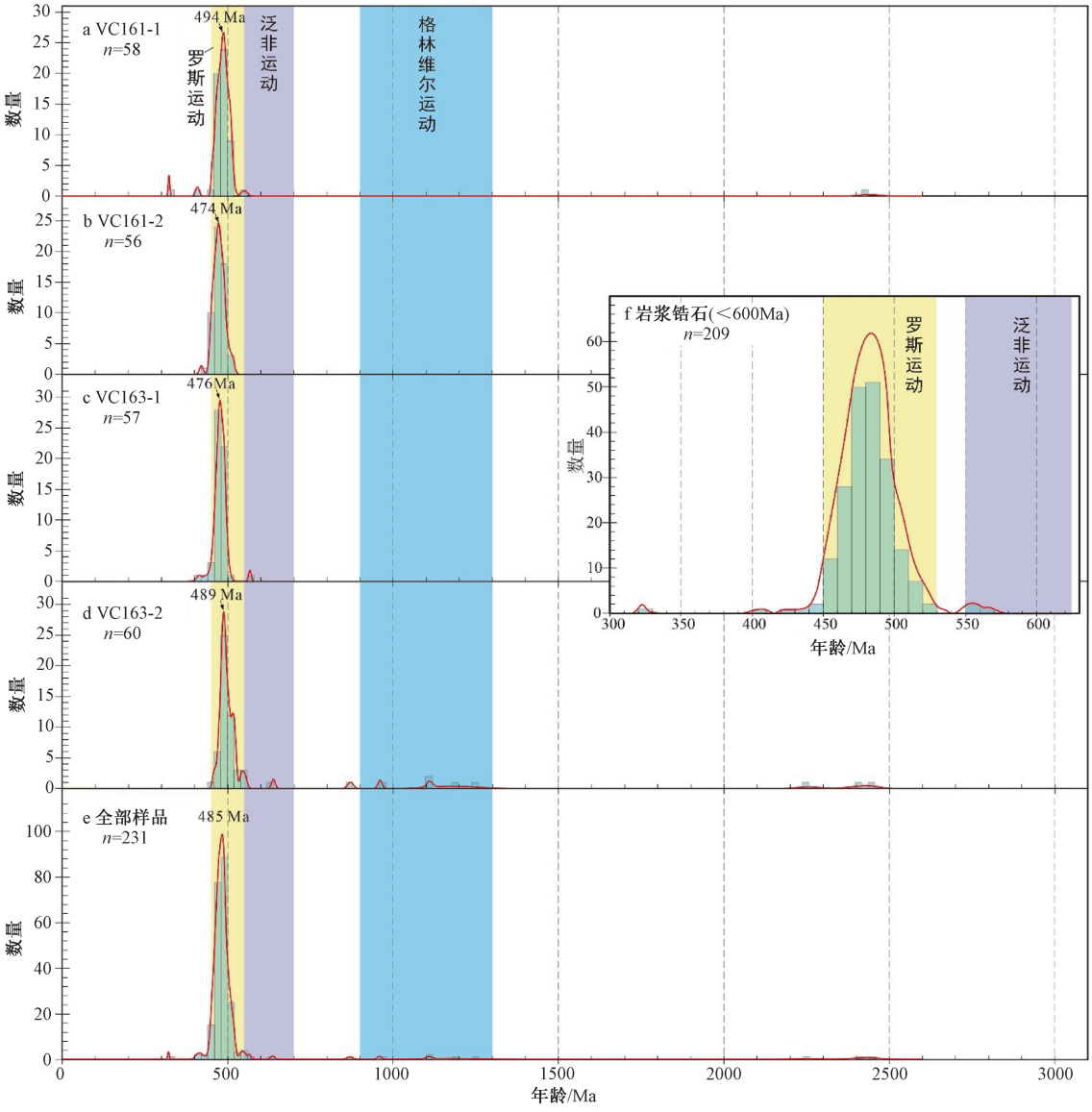


图 6 锆石年龄直方图

Fig. 6 Zircon age histogram diagram

锆石年龄组成特征至关重要。

利用 Th/U 比值来区分岩浆锆石和变质锆石是最常用的方法（吴元保和郑永飞，2004）。此次测试的锆石样品中，大部分锆石的 Th/U 比值均大于 0.4，仅样品 VC163-2 中存在 1 颗锆石小于 0.1，而且 4 件样品的锆石 Th/U 平均值为 0.57～0.77，总体显示了岩浆锆石的特征。同时通过 CL 图像分析发现，锆石主要以自形为主，除了样品 VC163-2 中存在少量明显发育次生边的变质继承锆石，剩余锆石颗粒均具有明显岩浆锆石的特征（图 5）。另外，通过锆石稀土元素特征分析显示，除了少量锆石颗粒（约 13 个）具有热液锆石特征外，其余锆石的稀土配分曲线与岩浆锆石特征一致，也显示出以岩浆锆石为主的特征（图 7）。其中，样品 VC163-2 中发育有次生边的元古代锆石其稀土元素均具有岩浆锆石特征，代表了元古代时期岩浆活动的特征。

综合 Th/U 比值、CL 图像和稀土元素等方面的特征分析，4 件松散物样品中获得的 231 颗谐和度>90%的锆石颗粒中存在大约 12 颗可能的变质继承锆石，剩余岩浆锆石的年龄区间总体以 520～450 Ma 为主，代表了罗斯造山带内的岩浆活动时代（图 6f）。

5.2 锆石物源对比分析

此次测试样品选择了冰碛物和海岸堆积物中 5～12 目（直径 1400～4000 μm）和>12 目（直径

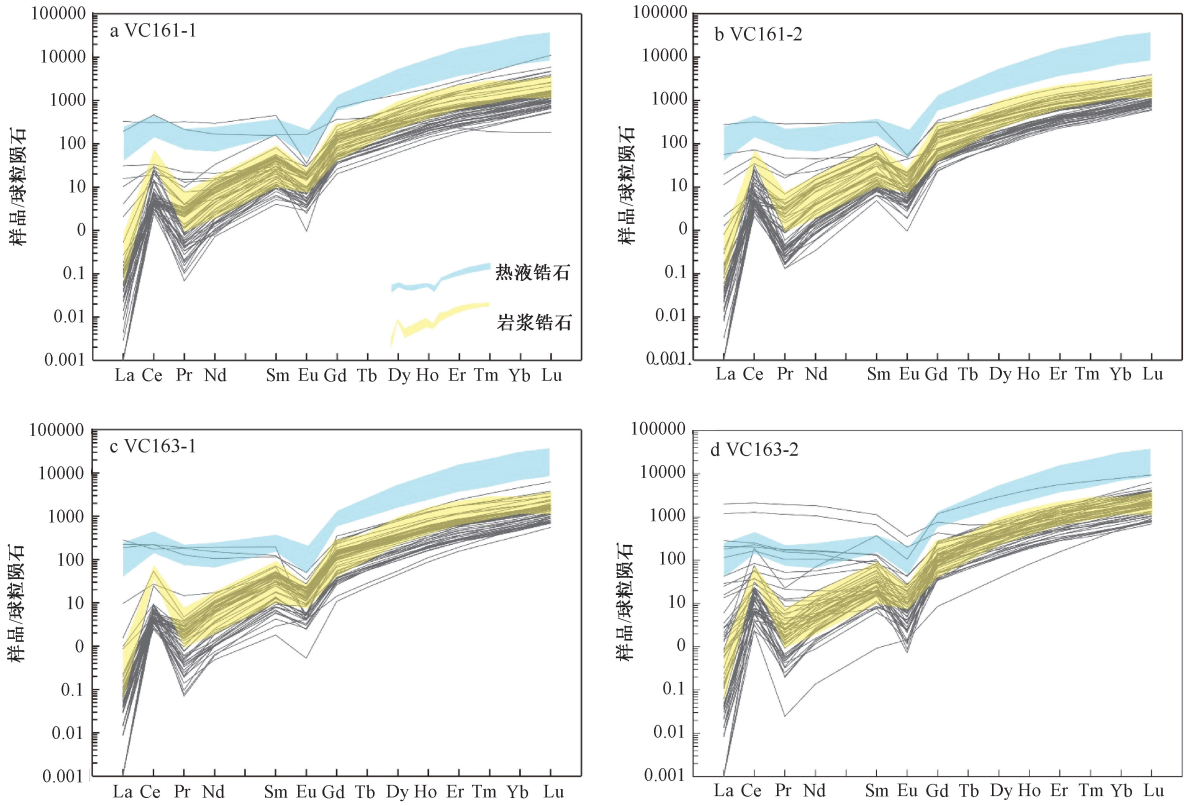


图 7　碎屑锆石稀土配分曲线与岩浆锆石和热液锆石特征对比图（标准化值据 Sun and McDonough，1989；典型岩浆锆石和热液锆石数据来源于 Hoskin，2005）

Fig. 7　Chondrite-normalized REE patterns of detrital zircons and comparison of characteristics between magmatic and hydrothermal zircons（Normalization values were after Sun and McDonough，1994；Typical magmatic and hydrothermal zircon datas were obtained from Hoskin，2005）

<1400 μm）两种粒径的松散砾石。其中 5～12 目（直径 1400～4000 μm）松散砾石的粒径明显大于此次测试锆石的粒径，所以这些锆石全部来源于沉积物中的岩石砾石；而>12 目（直径<1400 μm）的松散砾石中则可能包含有单独的锆石颗粒（图 5）。通过对比冰碛物和海岸堆积物的碎屑锆石年龄发现，冰碛物中两种粒径砾石的锆石年龄分别为 550～323 Ma 和 517～421 Ma，表明粗细砾石中的岩石组成基本一致（图 6a、6b）；而海岸堆积物两种粒径砾石的碎屑锆石年龄主要为 568～414 Ma 和 2443～458 Ma，细颗粒砾石中发育较多元古代的锆石，而且锆石磨圆较明显，表明细颗粒松散物中发育较多单颗粒的锆石（图 6c、6d）。进一步对比相同粒径的沉积物发现，两种松散沉积物中 5～12 目（直径 1400～4000 μm）砾石的年龄组成基本一致（550～323 Ma 与 568～414 Ma），表明冰碛物和海岸沉积物中的岩石砾石组成基本一致（图 6a、6c）；而>12 目（直径<1400 μm）的砾石中年龄特征差异明显，这种差异进一步表明元古代锆石年龄可能来源于较细的单颗粒锆石（图 6b、6d）。

上述对比分析显示，此次碎屑锆石年龄的差异主要与沉积类型有关，其中海岸堆积物中发育有元古代岩浆锆石，而冰碛物中主要以早古生代锆石为主（图 6）。结合难言岛所在的地理位置（图 2），难言岛地区松散物碎屑锆石年龄总体反映了北维多利亚地和周缘地区的年龄特征。其中，冰碛物和海岸沉积物中大颗粒砾石的碎屑锆石年龄可能主体反映了其西侧北维多利亚地内部的岩石年龄特征，而海岸沉积物中细颗粒物质，尤其是单颗粒锆石，有可能是来源于远离北维多利亚地的其他地区，如中横贯南极山脉等地区（Paulsen et al.，2016）。

难言岛所在的特拉诺瓦杂岩体岩浆活动时代主体为 521～475 Ma（Borsi et al.，1995；Rocchi et al.，1998；Di Vincenzo and Rocchi，1999；Perugini et al.，2005；Giacomini et al.，2007；王伟等，2014；Chen et al.，2019）；威尔逊地体内部岩体已获得年龄为 544～485 Ma（Federico et al.，2009；

Rocchi et al., 2011, 2015)；南维多亚地和中横贯南极山脉等地区岩浆岩年龄为 565～484 Ma (Paulsen et al., 2013; Hagen-Peter and Cottle, 2016; Glen and Cooper, 2021)。而罗伯逊湾地体和鲍尔斯地体中出露的阿德默勒尔蒂侵入体均为泥盆纪 (Estrada et al., 2016)。文中在难言岛地区松散物中获得的碎屑锆石年龄值为 2443～323 Ma，其峰值年龄区间为 530～450 Ma，对比难言岛地区所处的构造位置，元古代的碎屑锆石可能来源于罗斯海南部的米勒岭地区 (Boger, 2011; Estrada et al., 2016)，而<450 Ma 的碎屑锆石可能来源于维多利亚地鲍尔斯地体和罗伯逊湾地体中的泥盆纪岩体。对于碎屑锆石中年龄区间为 520～450 Ma 的岩浆锆石物源特征，其中 520～480 Ma 的岩浆锆石与难言岛所在的威尔逊地体南部地区的岩浆年龄完全一致，而 480～440 Ma 的岩浆锆石应该来源于维多利亚地内部陆内变形过程中的岩浆活动 (Di Vincenzo et al., 1997, 2001, 2014) 和变质沉积中的年轻碎屑锆石 (Paulsen et al., 2015, 2016; Estrada et al., 2016)，反映了罗斯造山带内存在奥陶纪时期的与陆内变形相关的岩浆活动。

5.3 罗斯运动的岩浆演化过程

早期在北维多利亚地变质沉积岩中获得的碎屑锆石年龄组成特征表明沿太平洋-冈瓦纳边缘发育的中元古代至新元古代 (1200～950 Ma) 的年龄群很可能与罗迪尼亚超大陆的岩石构造事件有关 (Paulsen et al., 2016)。文中在海岸堆积物中也获得了少量反映该构造事件的年龄组成。

罗斯运动最初的概念是指维多利亚地罗斯超群内地层变形与变质作用 (Gunn and Warren, 1962)，随着后期俯冲阶段岩浆岩石学和年代学等方面研究的深入，罗斯运动的概念发生了变化，代表了冈瓦纳大陆边缘的俯冲增生过程，该过程除了包含寒武—奥陶纪地层的变形变质，也包含了早期俯冲阶段产生的大量花岗质岩浆岩体 (Stump, 1995; Giacomini et al., 2007; Federico et al., 2009, 2010; Di Vincenzo et al., 2016; Hagen-Peter and Cottle, 2016; Paulsen et al., 2016; Chen et al., 2019)，所以罗斯运动应该还包括了晚期陆内变形阶段的岩浆活动。

相比北维多利亚地罗斯超群变质沉积岩中的碎屑锆石年龄组成特征 (Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016)，大陆边缘松散堆积物中碎屑锆石年龄数据更加集中，基本呈现出单个峰值区间的特征 (图 5)。通过锆石成因和物源分析发现，北维多利亚地难言岛地区冰碛物和海岸沉积物中岩浆锆石的年龄区间总体以 520～450 Ma 为主，可以代表北维多利亚地或罗斯造山带内俯冲碰撞和陆内变形阶段岩浆活动的时代，该年龄值包含了该地区获得的基岩岩体年龄 (Chen et al., 2019)，而且比北维多利亚地变质沉积岩中碎屑锆石年龄谱的年轻端 (约 493～481 Ma) 分布范围更广 (Paulsen et al., 2016)。

寒武—奥陶纪时期，罗斯造山带总体处于岩浆弧的构造背景下，并且通过岩石地球化学特征的差异推测出古太平洋向西南俯冲的构造位置，而特拉诺瓦杂岩体正好位于俯冲带边缘靠近大陆的一侧 (Rocchi et al., 1998; Federico et al., 2009)。难言岛所在的特拉诺瓦杂岩体正好记录了罗斯运动这一俯冲—碰撞—陆内伸展的演化过程 (Rocchi et al., 1998; Di Vincenzo and Rocchi, 1999)。根据不同时期岩浆活动的构造环境研究显示，特拉诺瓦杂岩体在 500～480 Ma 期间经历了俯冲—碰撞—陆内伸展的岩浆演化过程 (Black and Sheraton, 1990; Rocchi et al., 1998; Di Vincenzo and Rocchi, 1999; Giacomini et al., 2007; Federico et al., 2009; Chen et al., 2019)，其中陆内伸展的起始时代大约在 480 Ma，表明罗斯造山带在 480 Ma 之后便进入了陆内演化阶段，并造成了罗斯超群的变形与变质 (Di Vincenzo et al., 1997, 2001, 2014)。

文中在难言岛东部松散堆积物中获得的岩浆锆石峰值区间的年轻年龄端为 450 Ma，该年龄与莫罗祖米岭 (Morozumi Range) 岩脉中年轻锆石的年龄 (Rocchi et al., 2015) 和威尔逊地体中剪切带的变形时代基本一致 (Di Vincenzo et al., 2007)，与北维多利亚地广泛发育的不整合覆盖于寒武纪地层之上的陆相沉积，以及构造事件结束的时间一致 (Estrada et al., 2016)，而且与冈瓦纳大陆边缘沉积相转变的时代 (443 Ma) 基本吻合 (Glen and Cooper, 2021)。这可能代表罗斯运动晚期陆内伸展阶段岩浆活动结束的时代。而在罗斯超群变形变质之后的区域性不整合则为泥盆—三叠纪贝肯超群所覆盖，该不整合代表了冈瓦纳大陆的初始裂解 (陈廷愚等, 2008; Boger, 2011)，这与罗斯运动无关。

6 结论

（1）北维多利亚地难言岛大部分地区均被松散堆积物覆盖，包括冰碛物和现代海岸堆积，并以冰碛物堆积覆盖为主。

（2）4 件冰碛物和海岸沉积样品中的碎屑锆石年龄值具有单一峰谱的特征，年龄区间为 2443～323 Ma，主要集中于 530～450 Ma 之间，峰值年龄约为 485 Ma。

（3）通过对碎屑锆石 Th/U 比值、CL 图像和稀土元素等方面的特征分析显示，大部分锆石具有典型岩浆锆石的特征，可以反映周缘地区岩浆活动的时代特征。

（4）北维多利亚地及其周缘地区在罗斯运动晚期陆内变形阶段的岩浆活动持续至 450 Ma，该年龄可能代表了罗斯运动结束的时代。

致谢：感谢中国第 30、31、32 次南极考察队和维多利亚地新站选址队员在野外考察工作中的帮助，非常感谢审稿人提出的建设性意见和建议。

References

ANDERSEN T, 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 192 (1-2): 59-79.

BLACK L P, SHERATON J W, 1990. The influence of Precambrian source components on the U-Pb zircon age of a Palaeozoic granite from Northern Victoria Land, Antarctica [J]. Precambrian Research, 46 (4): 275-293.

BOGER S D, MILLER J M, 2004. Terminal suturing of Gondwana and the onset of the Ross-Delamerian Orogeny: the cause and effect of an Early Cambrian reconfiguration of plate motions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 219 (1-2): 35-48.

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

BORSI L, PETRINI R, TALARICO F, et al., 1995. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of amphibolite dykes of northern Victoria Land, Antarctica [J]. Lithos, 35 (3-4): 245-259.

BRACCIALI L, DI VINCENZO G, ROCCHIS, et al., 2009. The Tiger Gabbro from northern Victoria Land, Antarctica: the roots of an island arc within the early Palaeozoic margin of Gondwana [J]. Journal of the Geological Society, 166 (4): 711-724.

CAPPONI G, CRISPINI L, MECCHERI M, 1999. Structural history and tectonic evolution of the boundary between the Wilson and Bowers terranes, Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica [J]. Tectonophysics, 312 (2-4): 249-266.

CHEN H, WANG W, ZHAO Y, 2019. Constraints on early Paleozoic magmatic processes and tectonic setting of Inexpressible Island, Northern Victoria Land, Antarctica [J]. Advances in Polar Science, 30 (1): 52-69.

CHEN T Y, SHEN Y B, ZHAO Y, et al., 2008. Geological development of Antarctica and evolution of Gondwanaland [M]. Beijing: Business Printing House: 1-372. (in Chinese)

CRADDOCK C, 1970. Geologic Map of Antarctica (1∶5000000). American Geographical Society, Antarctic map folio series, 12: Pl. XXIII.

DI VINCENZO G, PALMERI R, TALARICO F, et al., 1997. Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctica [J]. Journal of Petrology, 38 (10): 1391-1417.

DI VINCENZO G, ROCCHI S, 1999. Origin and interaction of mafic and felsic magmas in an evolving late orogenic setting: the Early Paleozoic Terra Nova Intrusive Complex, Antarctica [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 137 (1-2): 15-35.

DI VINCENZO G, GHIRIBELLI B, GIORGETTI G, et al., 2001. Evidence of a close link between petrology and isotope records: constraints from SEM, EMP, TEM and in situ ^{40}Ar-^{39}Ar laser analyses on multiple generations of white micas (Lanterman Range, Antarctica) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 192 (3): 389-405.

DI VINCENZO G, CAROSI R, PALMERI R, et al., 2007. A comparative U-Th-Pb (zircon-monazite) and ^{40}Ar-^{39}Ar (muscovite-biotite) study of shear zones in northern Victoria Land (Antarctica): Implications for geochronology and localized reworking of the Ross Orogen [J]. Journal of Metamorphic Geology, 25 (6): 605-630.

DI VINCENZO G, ROSSETTI F, VITI C, et al., 2013. Constraining the timing of fault reactivation: Eocene coseismic slip along a Late Ordovician ductile shear zone (northern Victoria Land, Antarctica) [J]. GSA Bulletin, 125 (3-4): 609-624.

DI VINCENZO G, GRANDE A, ROSSETTI F, 2014. Paleozoic Siliciclastic rocks from northern Victoria Land (Antarctica): provenance, timing of deformation, and implications for the Antarctica-Australia connection [J]. GSA Bulletin, 126 (11-12): 1416-1438.

DI VINCENZO G, HORTON F, PALMERI R, 2016. Protracted (～30 Ma) eclogite-facies metamorphism in northern Victoria Land (Antarctica): implications for the geodynamics of the Ross/Delamerian Orogen [J]. Gondwana Research, 40: 91-106.

ELLIOT D H, FANNING C M, 2008. Detrital zircons from upper Permian and lower Triassic Victoria Group sandstones, Shackleton Glacier region, Antarctica: evidence for multiple sources along the Gondwana plate margin [J]. Gondwana Research, 13 (2): 259-274.

ESTRADA S, LÄUFER A, ECKELMANN K, et al., 2016. Continuous Neoproterozoic to Ordovician sedimentation at the East Gondwana margin-implications from detrital zircons of the Ross Orogen in northern Victoria Land, Antarctica [J]. Gondwana Research, 37: 426-448.

FARABEE M J, TAYLOR E L, TAYLOR T N, 1990. Correlation of Permian and Triassic palynomorph assemblages from the central Transantarctic Mountains, Antarctica [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 65 (1-4): 257-265.

FEDERICO L, CRISPINI L, CAPPONI G, et al., 2009. The Cambrian ross orogeny in northernVictoria Land (Antarctica) and New Zealand: a synthesis [J]. Gondwana Research, 15 (2): 188-196.

FEDERICO L, CRISPINI L, CAPPONI G, 2010. Fault-slip analysis and transpressional tectonics: A study of Paleozoic structures in northern Victoria Land, Antarctica [J]. Journal of Structural Geology, 32 (5): 667-684.

GIACOMINI F, TIEPOLO M, DALLAI L, et al., 2007. On the onset and evolution of the Ross-orogeny magmatism in North Victoria Land—Antarctica [J]. Chemical Geology, 240 (1-2): 103-128.

GLEN R A, COOPER R A, 2021. Evolution of the East Gondwana convergent margin in Antarctica, southern Australia and New Zealand from the Neoproterozoic to latest Devonian [J]. Earth-Science

Reviews, 220: 103687.

GOODGE J W, FANNING C M, BENNETT V C, 2001. U-Pb evidence of ~ 1.7 Ga crustal tectonism during the Nimrod Orogeny in the Transantarctic Mountains, Antarctica: implications for Proterozoic plate reconstructions [J]. Precambrian Research, 112 (3-4): 261-288.

GUNN B M, WARREN G, 1962. Geology of victoria land between the Mawson and Mullock glaciers, ross Dependency, Antarctica [R]. New Zealand Geological Survey Bulletin, New Series, No. 71, 1-157.

HAGEN-PETER G, COTTLE J M, 2016. Synchronous alkaline and subalkaline magmatism during the late Neoproterozoic-early Paleozoic Ross orogeny, Antarctica: insights into magmatic sources and processes within a continental arc [J]. Lithos, 262: 677-698.

HOSKIN P W O, 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69 (3): 637-648.

LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internalstandard [J]. Chemical Geology, 257 (1-2): 34-43.

LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al., 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 51 (1-2): 537-571.

LUDWIG K R, 2003. ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center: 70.

PALMERI R, SANDRONI S, GODARD G, et al., 2012. Boninite-derived amphibolites from the Lanterman-Mariner suture (northern Victoria Land, Antarctica): New geochemical and petrological data [J]. Lithos, 140-141: 200-223.

PAULSEN T S, ENCARNACIÓN J, GRUNOW A M, et al., 2007. New age constraints for a short pulse in Ross orogen deformation triggered by East-West Gondwana suturing [J]. Gondwana Research, 12 (4): 417-427.

PAULSEN T S, ENCARNACIÓN J, GRUNOW A M, et al., 2013. Age and significance of 'outboard' high-grade metamorphics and intrusives of the Ross orogen, Antarctica [J]. Gondwana Research, 24 (1): 349-358.

PAULSEN T S, ENCARNACIÓN J, GRUNOW A M, et al., 2015. Detrital mineral ages from the Ross Supergroup, Antarctica: Implications for the Queen Maud terrane and outboard sediment provenance on the Gondwana margin [J]. Gondwana Research, 27 (1): 377-391.

PAULSEN T S, DEERING C, SLIWINSKI J, et al., 2016. Detrital zircon ages from the Ross Supergroup, north Victoria Land, Antarctica: Implications for the tectonostratigraphic evolution of the Pacific-Gondwana margin [J]. Gondwana Research, 35: 79-96.

PERUGINI D, POLI G, ROCCHI S, 2005. Development of viscous fingering between mafic and felsic magmas: evidence from the Terra Nova Intrusive Complex (Antarctica) [J]. Mineralogy and Petrology, 83 (3-4): 151-166.

ROCCHI S, TONARINI S, ARMIENTI P, et al., 1998. Geochemical and isotopic structure of the early Palaeozoic active margin of Gondwana in northern Victoria Land, Antarctica [J]. Tectonophysics, 284 (3-4): 261-281.

ROCCHI S, BRACCIALI L, DI VINCENZO G, et al., 2011. Arc accretion to the early Paleozoic Antarctic margin of Gondwana in Victoria Land [J]. Gondwana Research, 19 (3): 594-607.

ROCCHI S, DI VINCENZO G, DINI A, et al., 2015. Time-space focused intrusion of genetically unrelated arc magmas in the early Paleozoic Ross-Delamerian Orogen (Morozumi Range, Antarctica) [J]. Lithos, 232: 84-99.

ROSSETTI F, VIGNAROLI G, DI VINCENZO G, et al., 2011. Long-lived orogenic construction along the paleo-Pacific margin of Gondwana (deep freeze range, North Victoria Land, Antarctica) [J]. Tectonics, 30 (4): TC4008.

SHERATON J W, BABCOCK R S, BLACK L P, et al., 1987. Petrogenesis of granitic rocks of the Daniels Range, northern Victoria Land, Antarctica [J]. Precambrian Research, 37 (4): 267-286.

STUMP E, FITZGERALD P G, 1992. Episodic uplift of the transantarctic mountains [J]. Geology, 20 (2): 161-164.

STUMP E, 1995. Ross orogen of the transantarctic mountains [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-284.

SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of Oceanic Basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42 (1): 313-345.

TALARICO F, BORSI L, LOMBARDO B, 1995. Relict granulites in the Ross Orogen of northern Victoria Land (Antarctica), II. Geochemistry and palaeo-tectonic implications [J]. Precambrian Research, 75 (3-4): 157-174.

TALARICO F, CASTELLI D, 1995. Relict granulites in the Ross orogen of northern Victoria Land (Antarctica), I. Field occurrence, petrography and metamorphic evolution [J]. Precambrian Research, 75 (3-4): 141-156.

WANG W, HU J M, CHEN H, et al., 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geological constraint of intrusive rocks from the Inexpressible Island, Northern Victoria Land, Antarctica [J]. Geological Bulletin of China, 33 (12): 2023-2031. (in Chinese with English abstract)

WEAVER S D, BRADSHAW J D, LAIRD M G, 1984. Geochemistry of Cambrian volcanics of the Bowers Supergroup and implications for the Early Palaeozoic tectonic evolution of northern Victoria Land, Antarctica [J]. Earth and Planetary Science Letters, 68 (1): 128-140.

WU Y B, ZHENG Y F, 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 49 (16): 1589-1604. (in Chinese)

附中文参考文献

陈廷愚，沈炎彬，赵越，等，2008. 南极洲地质发展与冈瓦纳古陆演化 [M]. 北京：商务印书馆：1-372.

王伟，胡健民，陈虹，等，2014. 南极北维多利亚地难言岛侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地质通报，33 (12)：2023-2031.

吴元保，郑永飞，2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报，49 (16)：1589-1604.

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