

东南极拉斯曼丘陵地区变质杂岩的层序与构造变形过程

胡健民^{1,2,3}, 王伟^{1,2,3}, 赵越^{1,2,3}, 刘晓春^{1,2,3}, 陈虹^{1,2,3}, 董晓朋^{1,3}

HU Jianmin^{1,2,3}, WANG Wei^{1,2,3}, ZHAO Yue^{1,2,3}, LIU Xiaochun^{1,2,3}, CHEN Hong^{1,2,3}, DONG Xiaopeng^{1,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 中国地质调查局极地地质研究中心, 北京 100081;
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081

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

2. *Research Center for Polar Geosciences, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

HU J M, WANG W, ZHAO Y, et al., 2021. Sequence and tectonic deformation process of metamorphic complex in the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (5): 719-735. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.059

Abstract: The Larsemann Hills are located on the eastern coast of the Prydz Bay in East Antarctica. Based on large-scale geological mapping, metamorphic complex in the Larsemann Hills was found to be layered orderly in general, and therefore, the Larsemann Group is established. The Larsemann Group is subdivided into 6 rock formations, and the protolith formation age is the Mesoproterozoic. The group has experienced the superposition of the Grenvillian and Pan-African metamorphism, and the metamorphic grade reached upper amphibolite facies to granulite facies. The main structural line in the Larsemann Hills is in the NEE-SWW strain, which generally constitutes a synclinorium structure verging to NEE. The distribution of several rock formations also shows the gradually younging from east to west. The NNW-SSE deformation of the structural line is obviously superimposed on the eastern Mirror Peninsula. The study shows that the Larsemann Group has suffered 6 periods of deformation, including the early Neoproterozoic Grenvillian period (D1), the late Neoproterozoic to early Paleozoic Pan-African periods (D2, D3, D4 and D5) and the Meso-Cenozoic extension (D6). The foliations presented in the rocks are actually the composite foliations of both the Grenvillian and Pan-African events, and the Pan-African event is demonstrated stronger than the Grenvillian event, which is rarely preserved in the gneisses. Constrained with both the metamorphic age of the Larsemann Group and the intrusion time of the Progress granite, it is believed that the D2~D5 deformations occurred during the span of 550 ~ 500 Ma. Thus, both the metamorphism and deformation features of rocks from the Larsemann Hills show that the Mesoproterozoic Larsemann Group have witnessed two orogenies of Grenvillian and Pan-African periods, respectively, and the breakup of the Gondwana.

Key words: East Antarctica; Larsemann Hills; Larsemann Group; tectonic deformation; tectonic framework

摘要: 东南极拉斯曼丘陵地区位于兰伯特裂谷东缘普里兹湾东岸, 该地区主要出露一套麻粒岩相变质岩, 前期对原岩时代、变质过程等进行了详细研究, 但是对于变质杂岩的层序和变形过程研究相对薄弱。文章通过大比例尺地质填图, 发现拉斯曼丘陵地区变质杂岩总体成层有序, 在此基础上建立拉斯曼岩群, 并将其划分成 6 个岩组, 原岩形成时代为中元古代。拉斯曼岩群经历了格林维尔期和泛非期变质作用的叠加, 变质程度均达到高角闪岩相-麻粒岩相。拉斯曼丘陵地区主体构造线方向为北东东-南西西方向, 总

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41530209, 41941004, 40872135); 中国地质调查局地质调查项目 (1212010711509, DD20160060)

This research is financially supported by the National Natural Sciences Foundation of China (Grant No. 41530209, 41941004, 40872135) and the Geological Investigation Project of China Geological Survey (Grant No. 1212010711509, DD20160060)

第一作者简介: 胡健民 (1959—), 男, 博士, 研究员, 从事构造地质学与区域地质学研究。E-mail: 546045354@qq.com

收稿日期: 2021-08-30; **修回日期:** 2021-09-22; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 胡健民, 王伟, 赵越, 等, 2021. 东南极拉斯曼丘陵地区变质杂岩的层序与构造变形过程 [J]. 地质力学学报, 27 (5): 719-735. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.059

体上构成往北东方向翘起的复式向斜构造,几个岩组的分布也显示由东向西逐渐变新。东部米洛半岛一带明显叠加了北北西—南南东向的构造变形。研究表明,拉斯曼岩群经历了6次重要的构造变形,包括新元古代格林维尔期(D1)、新元古代—早古生代泛非期变质变形作用(D2, D3, D4, D5)以及中生代伸展作用(D6)。目前岩石中保存的主变形面理是格林维尔期和泛非期两次构造热事件的复合型面理,主要是泛非事件形成,格林维尔期变形面理呈残留状。综合拉斯曼岩群变质年龄及早古生代进步花岗岩体形成时代,认为D2~D5变形时代为550~500 Ma左右。因此,拉斯曼丘陵地区变质变形特征显示,中元古代拉斯曼岩群经历了格林维尔期和泛非期两次重要的造山作用,以及冈瓦纳大陆的裂解。

关键词: 东南极; 拉斯曼丘陵; 拉斯曼岩群; 构造变形; 构造格架

中图分类号: P548; P583 **文献标识码:** A

0 引言

东南极拉斯曼丘陵地区位于兰伯特裂谷东缘普里兹湾东岸,在约400 km²的范围内,大大小小半岛断续相连,是东南极大陆岩石出露面积最多的区域之一。先前研究认为拉斯曼丘陵地区变质岩主要是原岩分别形成于中新元古代的变泥质、变砂质沉积岩和中元古代晚期的复合正片麻岩(Sheraton et al., 1984)。

90年代初逐渐确认东南极存在泛非期构造热事件(Zhao et al., 1992, 1995b; Shiraiishi et al., 1994; Jacobs et al., 1998; Fitzsimons, 2000),但关于其构造属性一直存在不同的看法。一是认为泛非期事件是叠加在环东南极格林维尔活动带或局部太古宙结晶基底之上,是东非碰撞造山作用或罗斯大陆边缘俯冲作用在东冈瓦纳陆块内部的构造响应(Yoshida, 1995; Wilson et al., 1997; Yoshida et al., 2003)。另一种观点认为是东南极大陆内部的另一条碰撞造山带,代表东南极最后的拼贴,具体位置从普里兹湾向东北延伸到登曼冰川(Hensen et al., 1997; Meert and Van Der Voo, 1997; Fitzsimons, 2000; Boger et al., 2001; Liu et al., 2003; Zhao et al., 2003; Liu et al., 2006, 2007a, 2007b; Kelsey et al., 2008)。普里兹带从普里兹湾向南延伸到南极内陆格罗夫山地区(胡健民等, 2008; Liu et al., 2006, 2009),地球物理探测显示向南一直到东南极大陆边缘(An et al., 2015)。

目前普里兹带的研究已得出如下基本认识(Liu et al., 2007a, 2009, 2013; 李森等, 2007; Wang et al., 2008; Grew et al., 2012): ①镁铁质麻粒岩—长英质正片麻岩的原岩时代为~1380~1020 Ma,这些岩石形成于活动大陆边缘/大陆岛弧环境; ②格林维尔期构造热事件的影响普遍存在,

并可区分出>970 Ma和930~900 Ma两个变质期次,变质条件达麻粒岩相,并伴有同期紫苏花岗岩和淡色花岗岩的侵入; ③泛非期构造热事件的叠加是区域性的,达麻粒岩相,具有顺时针演化的P-T轨迹,同样伴有紫苏花岗岩和花岗岩的侵入。

拉斯曼丘陵地区是多国南极考察的基地所在,在这个区域内有中国的中山站、俄罗斯进步站、澳大利亚戴维斯站以及印度巴拉提站等多个科学考察站。1989年中山站建成后,持续的南极科考中,已基本完成了这一地区变质杂岩的岩石学、地球化学和同位素年代学研究,奠定了拉斯曼丘陵地区岩石-变质作用-年代学格架(Zhao et al., 1992, 1993, 1995a, 1995b; Tong et al., 1998; Liu et al., 2003; 李森等, 2017; 陈宣华等, 2007; Wang et al., 2008; Tong et al., 2014)。文章在拉斯曼丘陵地区1:25000地质图填图成果基础上(野外调查于中国第29次南极科学考察期间完成),对拉斯曼丘陵地区的构造格架、变质杂岩的组成和层序、构造变形序列与变形特征进行了比较详细的研究,获得了一些新的研究成果。

1 区域地质特征

拉斯曼丘陵地区是东南极普里兹湾三大基岩出露区之一,岩石出露面积仅次于西福尔丘陵和赖于尔群岛(图1),主体构造线方向为北东东—南西西方向,东部米洛半岛一带构造线方向为北北西—南南东向,总体上构成一个复杂的往北东东向翘起的复式向斜构造(图2)。主要由两套岩类组成(Tingey, 1981; Stüwe and Powell, 1989),一类是复合片麻岩杂岩,包括基性麻粒岩和长英质正片麻岩;另一类是变沉积岩序列,主要为含石墨的矽线石榴片麻岩、长英质片麻岩以及极少

量的钙硅酸盐岩, 与传统意义上的孔兹岩系相当, 间夹辉石黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩和少

量的花岗伟晶岩脉、混合岩和含榴花岗岩, 局部为正长花岗斑岩、二长花岗岩。

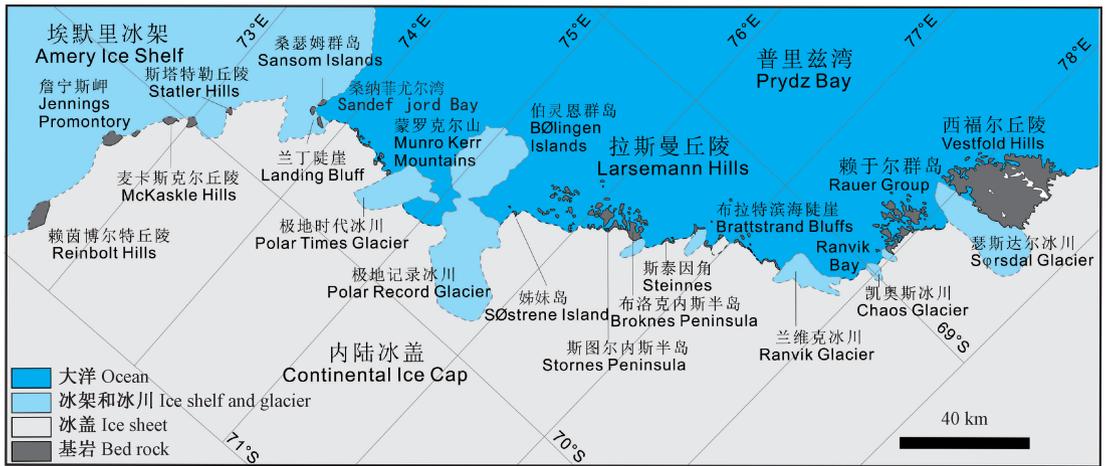


图 1 东南极拉斯曼丘陵地区构造位置图
Fig. 1 Location of the Larsemann Hills in East Antarctica

从不同岩石组合的总体分布状况看, 变质地层总体走向北东—南东向, 由东向西层位逐渐变新 (图 2)。东部米洛半岛和布洛克内斯半岛产状变化复杂, 西部岩石片麻理产状稳定。

拉斯曼丘陵北部香港岛一带分布复合正片麻岩组合, 出露层位最低。俄罗斯进步站以南东侧, 灰白色细粒块状片麻岩在中山站地区是层位最低的一套岩石 (Pt_2L_1), 其上为基性麻粒岩岩组 (Pt_2L_2), 变形较强, 沿走向延伸厚度不稳定, 但层位位置基本上在灰白色细粒块状片麻岩岩组 (Pt_2L_1) 与上覆混合岩化长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_3) 之间。再往上为富含矽线石-堇青石组合的泥质长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_4), 上部为富含磁铁矿-钛铁矿条带及柱晶石等含硼矿物的黑云斜长片麻岩, 原岩为泥砂质岩, 主要分布在中山站所在的米洛半岛, 西南高地上磁铁矿-钛铁矿条带及柱晶石集合体等比较富集。米洛半岛以西到五岳半岛, 拉斯曼丘陵地区的主体岩性为条带状混合岩化石榴矽线黑云长英质片麻岩, 原岩应为泥质砂岩及砂岩 (Pt_2L_5)。该层位岩石发生强烈的混合岩化, 野外主要表现为肉红色、灰白色条带状钾长花岗质混合岩化石榴黑云斜长片麻岩, 或者花岗质混合岩。拉斯曼丘陵地区层位最高的岩石组合分布在中西部的华西半岛、海西半岛及斯图尔内斯半岛, 主要岩性为深灰色、灰褐色中厚层状含辉石石榴黑云斜长片麻岩, 有时夹深灰色基性麻粒岩薄层及含磁铁矿石英岩夹层等 (Pt_2L_6), 也

发生肉红色、浅肉红色混合岩化。
东南极沿岸高级变质事件广泛存在 (Tingey, 1981; Black et al., 1987; Wang et al., 2008; Liu et al., 2009, 2013; Grew et al., 2012)。泛非期峰期变质作用条件达 700 MPa 和 800~850 °C, 变质程度为高角闪岩相-麻粒岩相 (Carson et al., 1995), 发生强烈混合岩化作用 (Fitzsimons and Harley, 1991; Dirks and Hand, 1995; Carson et al., 1995; Fitzsimons, 1997)。麻粒岩相变质作用年龄为 550~500 Ma (Zhao et al., 1992, 1995a; Hensen and Zhou, 1995; Fitzsimons, 1997)。

进步花岗岩出露在米洛半岛, 是一个北北西方向延伸的长条状中粗粒黑云钾长花岗岩体, 总体延伸方向与围岩片麻理方向大体一致 (图 2)。主要岩石为肉红色、褐灰色中—粗粒块状含石榴子石黑云花岗岩, 略具片麻理, 矿物成分主要有钾长石 (40%)、斜长石 (20%)、黑云母 (15%)、石英 (25%), 石榴子石含量变化大, 黑云母含量一般小于 10%。副矿物为磁铁矿、钛铁矿、尖晶石、磷灰石和锆石。

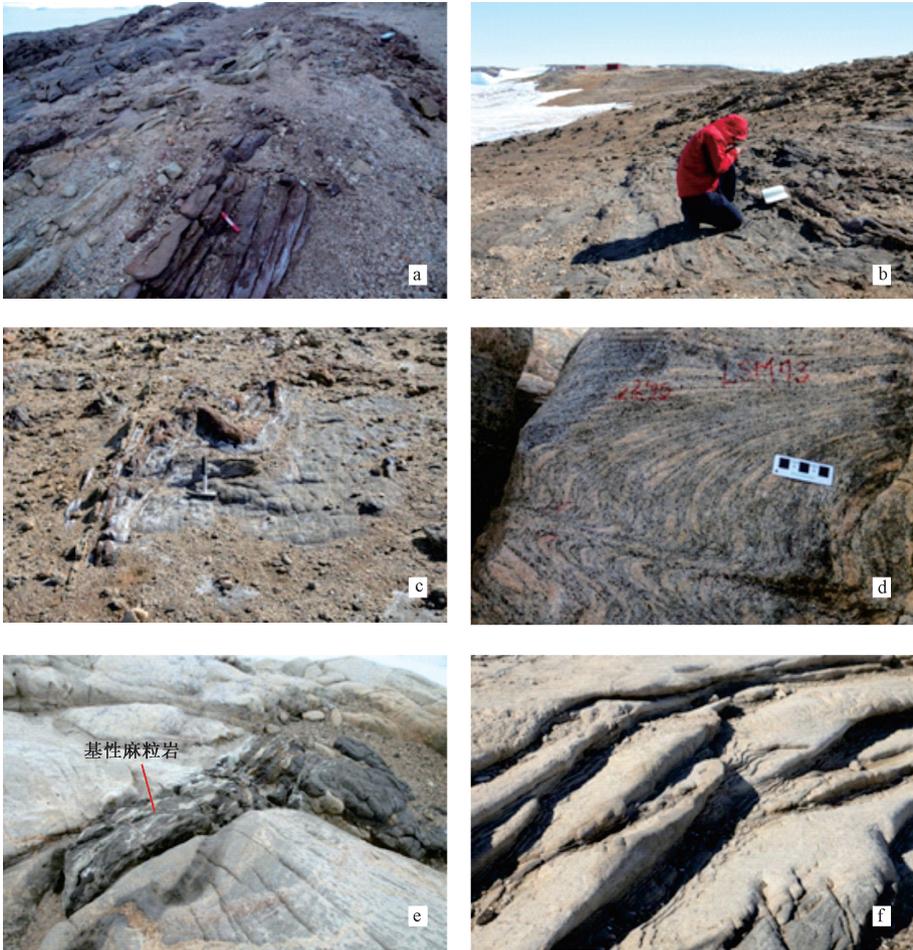
斯图尔内斯半岛东北部边缘-天龙岛-澳门岛、香港岛南侧岛峰、虎头岛、布洛克内斯半岛北部, 拉斯曼丘陵南部如劳基地、龙泉湖、牛头半岛等处也有零星泛非期花岗岩出露。花岗岩体均呈长条状延伸, 并且与其侵位处围岩片麻理的总体产状一致, 除米洛半岛中山站—进步站一带花岗岩体呈北北西向延伸外, 其他部位基本上呈近东西向延伸。进步花岗岩年龄分别为 514±7 Ma 和 516±7 Ma

(Carson et al., 1996)。由于局部部位花岗岩清楚地切穿了发育混合岩化浅色脉体的片麻岩, 所以花岗岩侵位略晚于泛非期变质作用深熔脉体形成的时代。

2 拉斯曼岩群 (Pt₂L)

根据东南极拉斯曼丘陵地区地质图 (1:

25000) (胡健民等, 2021), 出露在拉斯曼丘陵地区的这套变质杂岩成层有序, 称之为拉斯曼岩群 (Pt₂L)。自上而下划分为含辉石长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₆)、混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₅)、磁铁矿化泥质长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₄)、混合岩化长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₃)、基性麻粒岩岩组 (Pt₂L₂)、细粒块状片麻岩岩组 (Pt₂L₁) 等 6 个岩组 (图 2, 图 3)。



a—深灰色薄层状含辉石长英质片麻岩; b—混合岩化石榴黑云长英质片麻岩; c—含磁铁矿泥质长英质片麻岩; d—混合岩化长英质片麻岩; e—基性麻粒岩; f—细粒块状片麻岩

图 3 拉斯曼岩群各岩组代表性岩石

Fig. 3 Typical rocks of the Larsemann Group in the Larsemann Hills

(a) Dark gray thin bedded pyroxene-bearing quartzofeldspathic gneiss; (b) Migmatized garnet-biotite quartzofeldspathic gneiss; (c) Magnetite-bearing pelitic-quartzofeldspathic gneiss; (d) Migmatized quartzofeldspathic gneiss; (e) Mafic granulite; (f) Fine-grained massive gneiss

2.1 含辉石长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₆)

该岩组主体分布在斯图尔内斯半岛、布洛克内斯半岛、华西半岛等。主要岩性为深灰色、灰褐色中厚层状含辉石石榴黑云长英质片麻岩、条带状含堇青石石榴黑云石英片岩, 偶尔见有深灰

色、深灰绿色透镜状基性麻粒岩及黑云角闪斜长片麻岩及含磁铁矿石英岩夹层等, 肉红色、浅肉红色混合岩化强烈 (图 3a)。

含堇青石石榴黑云石英片岩: 主要矿物包括石英 (60%) 和黑云母 (30%)。石英呈他形粒

状, 粒径多为 0.5~2 mm。黑云母呈片状, 片长 0.5~1.5 mm, 定向排列明显, 褐红-深褐-淡黄色多色性。石榴子石 (5%) 呈粒状, 粒径 0.5~2 mm, 淡红色, 均质, 极高正突起。堇青石 (3%) 呈半自形柱状, 柱长 0.5 mm 左右。发育典型的柠檬黄色蚀变矿物集合体。副矿物主要为铁质不透明矿物 (2%), 多呈不规则细粒状。

含石榴子石黑云二长片麻岩: 主要矿物包括斜长石 (30%)、钾长石 (23%) 和石英 (20%)。斜长石多呈半自形板条状和他形粒状, 粒径多为 0.4~1 mm。钾长石呈他形粒状, 粒径 0.4~1 mm, 低负突起。石英他形粒状, 粒径多为 0.2~0.72 mm。黑云母 (15%) 片长可达 0.3~0.8 mm, 褐红-深褐-淡黄色多色性, 定向排列明显。石榴子石 (10%) 多呈粒状, 粒径多为 0.3~0.6 mm。副矿物主要为铁质不透明矿物 (2%), 不规则粒状和长条形 (钛铁矿)。

2.2 混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5)

该岩组分布在布洛克内斯半岛、牛头半岛及斯图尔内斯半岛, 在此区域 1:25 万地质图中被称为石榴子石黑云母石英片岩岩组 (胡健民等, 2021)。主要为米黄-褐灰色条带状含堇青石 (斜方辉石、柱晶石) 石榴黑云石英片岩 (图 3b), 块状构造, 石榴子石呈细条带状, 片麻理不连续, 常常有石英和斜方辉石组成的暗色条带; 上部普遍发育层状肉红色条带状花岗质混合岩、混合花岗岩, 浅色体主要为浅肉红色钾长花岗质脉体, 常见早期灰白色-浅灰白色混合花岗质浅色体。浅色体主要沿片麻理方向发育, 有时呈网状, 花岗质混合岩化脉体规模较大, 常常可达 1~2 m 宽。在斯图尔内斯半岛北部, 肉红色混合岩化非常强烈, 很多地方甚至以肉红色混合花岗质 (正长岩) 脉体为主。

含矽线石堇青石尖晶石黑云二长片麻岩: 主

要矿物包括钾长石 (30%)、斜长石 (25%) 和石英 (18%)。钾长石多呈他形粒状, 粒径 0.5~1.5 mm, 发育细密钠长石条纹。斜长石多呈他形粒状, 粒径 0.5~1.5 mm。石英多呈他形粒状, 粒径 0.05~0.5 mm。次要矿物主要为黑云母、铁尖晶石、堇青石和矽线石。黑云母 (10%) 片长 0.5~2 mm, 弱定向。铁尖晶石 (10%) 多呈不规则粒状, 粒径 0.5~1 mm, 多与铁质不透明矿物聚集。堇青石 (3%) 呈不规则粒状, 粒径 0.5~1.5 mm, 发育聚片双晶。矽线石 (2%) 多呈长柱状, 柱长可达 1 mm 左右, 部分颗粒呈板柱状。副矿物中主要包括铁质不透明矿物 (2%), 多与铁尖晶石聚集。原岩可能为铁质硅质岩。

浅色花岗质脉体: 主要矿物主要包括钾长石 (59%) 和石英 (25%)。钾长石多呈他形粒状, 粒径 0.7~1.5 mm, 少数达 2~3 mm 以上, 发育细密钠长石条纹。石英多呈他形粒状, 粒径 0.5~1.5 mm, 少数可达 2 mm 以上, 波状消光, 表明具有弱塑性变形的特征。黑云母 (10%) 片长 0.5~1.5 mm。副矿物主要包括铁尖晶石 (3%)、铁铝榴石 (2%) 和铁质不透明矿物 (1%)。铁尖晶石多呈不规则粒状, 粒径 0.5~1.5 mm。铁铝榴石多呈不规则粒状, 粒径 0.5~1.5 mm。

2.3 磁铁矿化泥质长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_4)

该岩组主要分布在米洛半岛一带。上、下部为灰白色、褐灰色条带状含矽线石堇青石尖晶石黑云二长片麻岩, 混合岩化强烈, 浅色体主要为浅肉红色黑云钾长花岗质脉体。下部主要为褐灰色、深灰色条带状含矽线石尖晶石铁质石英岩, 混合岩化斜方辉石矽线石柱晶石钛磁铁矿石榴黑云斜长片麻岩 (图 3c), 含铁石英岩夹层厚度可达 3~5 m, 是钛磁铁矿化层位 (图 2, 图 4)。钛磁铁矿、柱晶石、尖晶石多成自形晶, 有时岩石中石英含量较高。



a—磁铁矿化泥质长英质片麻岩露头特征; b—富磁铁矿条带

图 4 条带状磁铁矿化泥质长英质片麻岩

Fig. 4 Banded magnetically mineralized pelitic-quartzofeldspathic gneiss

(a) Outcrop of argillaceous felsic gneiss formation containing magnetite; (b) Magnetite-rich bands

含矽线石尖晶石铁质石英岩:主要矿物包括石英(46%)和铁质不透明矿物(40%)。石英呈他形粒状,粒径0.5~2.5 mm。铁质不透明矿物为不规则粒状,粒径可达2 mm,个别颗粒包含铁尖晶石。铁尖晶石(8%)多呈条带状包裹于铁质不透明矿物中,可能是出溶成因,即原来与铁质矿物呈固溶体。矽线石(2%)呈长柱状,发育柱面解理。少量钾长石(4%)和黑云母(<1%)。钾长石他形粒状,粒径0.5~1.2 mm,低负突起。

含石榴子石黑云花岗质片麻岩:主要矿物包括斜长石(45%)、钾长石(30%)和石英(20%)。斜长石半自形板条状和他形粒状,粒径2~3 mm。钾长石多呈他形粒状,粒径2~3 mm。石英呈他形粒状,粒径2~3 mm,波状消光。黑云母(3%)呈片状,无明显定向。石榴子石(2%)呈不规则粒状或筛状,粒径4 mm左右。

2.4 混合岩化长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₃)

该岩组主要分布在米洛半岛。主要由灰白色混合岩化含石榴子石黑云二长片麻岩组成(图3c)。浅色体主要是灰白色含石榴子石矽线石花岗岩脉体,石榴子石与黑云母经常聚集成不规则团块状及条带状。由于混合岩浅色脉体的发育,导致该类变质岩被风化后多呈网状结构,形成典型的蜂巢状岩石(图3d)。

含石榴子石黑云二长片麻岩:主要矿物包括钾长石(35%)、斜长石(25%)和石英(25%)。钾长石半自形板条状,粒径0.3~0.5 mm。斜长石他形粒状,粒径0.5~1 mm,部分颗粒发育细密钠长石条纹。石英呈他形粒状,粒径0.3~0.5 mm。石榴子石(8%)主要为铁铝榴石,不规则粒状,粒径3~4 mm。黑云母(10%)片长达0.2~0.8 mm,具明显定向性。副矿物主要为铁质不透明矿物(2%)。

含石榴子石矽线石花岗质脉体:主要矿物包括钾长石(53%)、斜长石(10%)和石英(25%)。钾长石多呈他形粒状,粒径0.5~1.5 mm,具有细密钠长石条纹。斜长石多呈他形粒状—半自形板条状,粒径0.3~0.8 mm,蠕英结构。石英多呈他形粒状,粒径0.3~1 mm。矽线石(10%)多呈长柱状,柱长0.5 mm。副矿物堇青石(<1%)和铁质不透明矿物。堇青石含量,多遭受蚀变呈柠檬黄色或黄褐色,粒径多为0.1~0.2 mm;铁质不透明矿物(<1%)颗粒细小,分散分布。

2.5 基性麻粒岩岩组 (Pt₂L₂)

该岩组主要分布在米洛半岛中山站站区一带。岩性为深灰色、深灰绿色基性麻粒岩(图3e)。典型矿物组合为斜方辉石+斜长石+角闪石+Fe-Ti氧化物+黑云母。岩石普遍经历较强的韧性剪切变形,发育一组拉伸线理以及典型的A型褶皱和鞘型褶皱,与上覆混合岩化片麻岩之间的剪切变形带比较明显。

基性麻粒岩:主要由斜长石(20%)、单斜辉石(25%)、斜方辉石(25%)、角闪石(20%)等组成。斜长石呈半自形板条状和不规则粒状,粒径<0.1 mm,少量为0.1~0.4 mm。单斜辉石和斜方辉石呈不规则粒状和半自形柱状,粒径0.3~1 mm,部分粒径<0.1 mm。角闪石多呈半自形柱状及不规则粒状,粒径0.5~2 mm。石榴子石(5%)多呈不规则粒状,粒径0.5~1 mm。石榴子石周边发育斜长石和斜方辉石蠕虫状集合体,应当是减压退变的产物。黑云母(2%)片长0.3~0.6 m。铁质不透明矿物(3%)多呈不规则粒状,粒径多为0.1~0.3 mm。

2.6 细粒块状片麻岩岩组 (Pt₂L₁)

该岩组可以分为两类。一类是变质砂岩,主要出露于中山站六角楼、俄罗斯进步2站、布洛克内斯半岛、牛头半岛及斯图尔内斯半岛。其中出露于中山站六角楼至俄罗斯进步2站一带的变质砂岩中石榴子石多呈条带状定向分布,形成弱的片麻理(图3f)。其矿物组合主要为斜长石+钾长石+石英+黑云母+石榴子石+矽线石+Fe-Ti氧化物±尖晶石。出露于布洛克内斯半岛、牛头半岛和斯图尔内斯半岛的变质砂岩的矿物组合与上述变质砂岩类似,只是某些矿物的含量不同,如尖晶石、石榴子石和矽线石等。第二类为变质泥质岩,原生露头主要出露于米洛半岛一带和斯图尔内斯半岛西部,典型矿物组合为斜长石+钾长石+石英+石榴子石+黑云母+矽线石+Fe-Ti氧化物±堇青石。

含石榴子石黑云二长片麻岩:主要由钾长石(37%)、斜长石(30%)和石英(20%)等组成。钾长石他形粒状,粒径0.5~2 mm。斜长石呈半自形板条状和他形粒状,粒径0.3~1 mm。石英呈他形粒状,粒径0.3~1 mm。黑云母(5%)片长0.3~0.5 mm,定向不明显。石榴子石(3%)多呈不规则粒状或浑圆状,粒径0.1~0.8 mm。石榴子石多成条带状定向分布,形成弱的片麻理。矽

线石 (2%) 呈长柱状, 0.1~0.2 mm, 与暗色矿物聚集分布。铁尖晶石 (2%) 多呈不规则粒状, 少数包裹于铁质不透明矿物质中分散分布, 与不透明矿物、矽线石和黑云母相对集中分布。不透明矿物 (1%) 不规则粒状, 少数呈板条状, 多数与铁尖晶石聚集, 少数分散分布。

3 构造变形特征

拉斯曼岩群经历了新元古代格林维尔期 (D1) 和新元古代—早古生代泛非期变质变形作用 (D2~D4) 与北东—南西向挤压 (D5), 中生代伸展破裂 (D6)。

3.1 构造格架

现今拉斯曼丘陵地区构造格架主要形成于泛非期构造作用以及晚期伸展破裂。包括翡翠半岛—紫阳湖复式向斜、露岩—海珠半岛—华西半岛向斜和斯图尔内斯半岛叠加褶皱变形区等主要构造。

(1) 翡翠半岛—紫阳湖复式向斜

正如前述, 拉斯曼丘陵地区主体构造线方向为北东东—南西西方向, 东部米洛半岛一带构造线方向为北北西—南南东向, 总体上构成一个复杂的往北东东向翘起的复式向斜构造 (图 2)。根据拉斯曼岩群不同岩组的分布, 向斜构造的核部位于斯图尔内斯半岛的北部, 主要由含辉石长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_6) 层状片麻岩组成, 翼部地层主要为混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5), 上部为层状肉红色条带状花岗质混合岩、混合花岗岩, 局部地方为米黄—褐灰色条带状石榴黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩等 (图 2)。从地层出露宽度分析, 向斜核部总体比较宽缓, 褶皱轴向南西西方向缓倾, 但由于向斜核部片麻理产状一般比较陡, 主体 $>45^\circ$, 因此该褶皱的核部应该是包络面比较宽缓的复式向斜。

拉斯曼丘陵地区沿褶皱轴向北东东方向, 主要地层为混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5), 下部为米黄—褐灰色条带状石榴黑云斜长片麻岩、云母石英片岩等, 上部为层状肉红色条带状花岗质混合岩、混合花岗岩。由于西部混合岩化强、东部混合岩化弱, 所以向东部在香港岛、布洛克内斯半岛、牛头半岛处以米黄—褐灰色条带状石榴黑云斜长片麻岩、云母石英片岩等为主。香港岛南部向西主要为层状肉红色条带状花岗质

混合岩。

在牛头半岛和米洛半岛之间的内拉海湾一带向斜核部翘起, 以东在米洛半岛出露拉斯曼岩群下部第 1~4 岩组 ($Pt_2L_1 \sim Pt_2L_4$)。

(2) 露岩—海珠半岛—华西半岛向斜

在翡翠半岛—紫阳湖复式向斜南侧发育相对紧闭的向斜, 即露岩—海珠半岛—华西半岛向斜 (图 2)。向斜核部地层为含辉石长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_6) 层状片麻岩, 翼部为混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5) 米黄—褐灰色条带状石榴黑云母斜长片麻岩及肉红色条带状花岗质混合岩。向斜西翘起端在斯图尔内斯半岛东海岸中部露岩—一带, 东翘起端在华西半岛南部。

(3) 布洛克内斯半岛—牛头半岛叠加褶皱变形区

三角半岛、布洛克内斯半岛、牛头半岛及米洛半岛南部, 主要出露混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5) 米黄—褐灰色条带状含石榴子石黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩等, 以及局部呈条带状出露的肉红色混合岩化石榴质片麻岩, 形成比较开阔的轴向北东东向向斜核部。牛头半岛南部和米洛半岛南部, 出露含磁铁矿泥质长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_4) 下部的混合岩化石榴辉石矽线石柱晶石钛磁铁矿石榴黑云斜长片麻岩, 为混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5) 之下地层出露形成的背斜轴迹。该区域片麻理走向变化比较大, 但是拉斯曼丘陵地质图 (1: 25000) 上清楚地显示北东东向向斜为主的构造格架 (胡健民等, 2021), 片麻理走向的变化也反映出存在一期走向北北西向褶皱叠加。太极峰南侧混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5) 清楚地显示叠加褶皱的存在。

(4) 米洛半岛叠加褶皱变形区

米洛半岛出露拉斯曼岩群下部几乎所有变质岩组 ($Pt_2L_1 \sim Pt_2L_5$) 以及进步花岗岩体。米洛半岛是拉斯曼丘陵地区叠加变形最强烈的区域, 而且主体构造线方向与拉斯曼丘陵地区其他岛屿北东—北东东向走向不一致, 表现为明显的北北西向 (图 2, 图 5)。由北东往南西方向有一系列紧闭的背向斜构造组成, 进步花岗岩体呈北北西向长条形沿一背斜轴侵位, 背斜核部的拉斯曼岩群第 4 岩组 (Pt_2L_4) 呈残留状。观景山一带由细粒块状片麻岩岩组 (Pt_2L_1) 和基性麻粒岩岩组 (Pt_2L_2) 形成轴向北北西向背斜核部, 但这个背斜

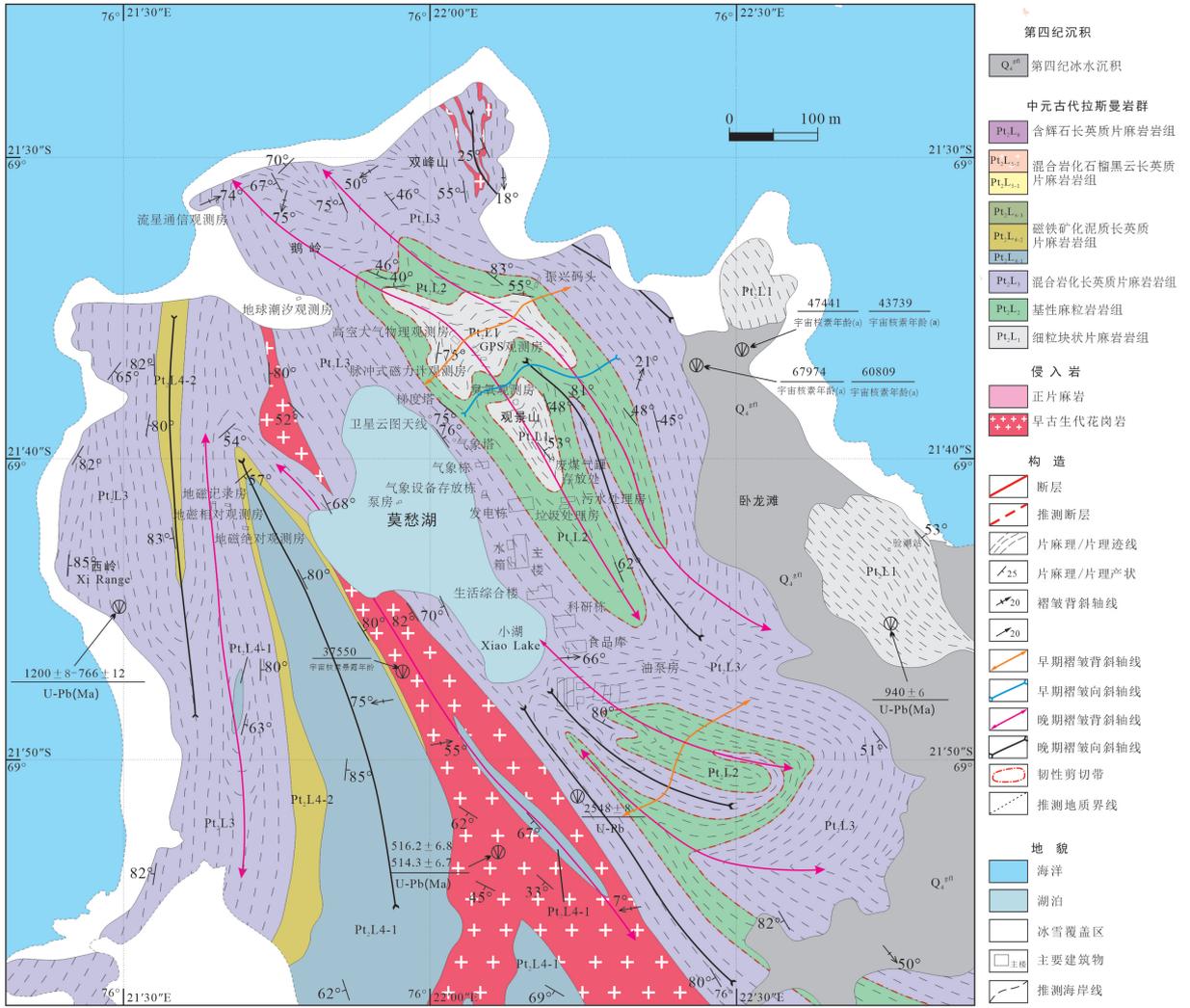


图 5 拉斯曼丘陵米洛半岛中山站地区地质构造图

Fig. 5 Structural geological map of the Mirror Peninsula in the Larsemann Hills

的长短轴之比显示褶皱轮廓为短轴褶皱特点, 存在早期轴向北东—北北东向褶皱 (图 6)。类似的褶皱在油泵房南侧也存在, 只是褶皱轮廓稍微复杂, 但残留的北东向褶皱轴还可以识别。由于北北西向紧闭褶皱的叠加, 早期褶皱一方面呈残留状, 另一方面褶皱轴也发生弯曲。此外, 在镁铁质麻粒岩分布的位置发育的低角度韧性剪切带将在 3.3 节中介绍。

3.2 复合型透入性变质变形面理

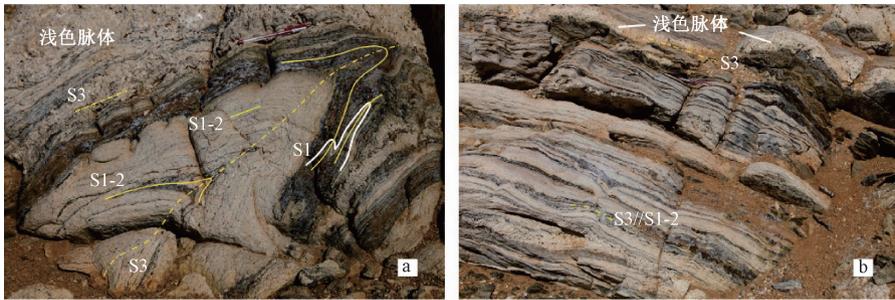
(1) 拉斯曼丘陵地区透入性面理是复合型变质变形面理 (图 6), 由格林维尔期与泛非期变形面理叠加形成 (S1-3)。泥质长英质片麻岩的片麻理是由长石、石英集合体条带与黑云母等暗色矿物相对富集的条带相间构成, 堇青石、矽线石、石榴子石、柱晶石以及尖晶石等顺片麻理分布 (S1-2)。混合花岗质片麻岩的片麻理主要由石英、

长石等浅色矿物与黑云母、辉石等暗色矿物定向排列形成 (S3//S1-2)。有时候可以在复合变形面理中发育早期残留面理顺片理褶皱变形, 如图 6a 中 S1 褶皱以及 S1-2 褶皱。褶皱了的基性麻粒岩变形面理主要由斜长石等浅色矿物和透辉石、斜方辉石及角闪石等暗色矿物定向排列构成。

(2) 拉斯曼丘陵地区变质杂岩早期片麻理 (S1-2) 及深熔脉体 (S3) 发育不规则流变褶皱和紧闭不对称褶皱, 常形成共轴递变叠加褶皱。顺片麻理发育的不对称剪切褶皱显示顶部向南南西方向的下滑, 滑动方向与拉伸线理倾伏方向一致 (图 7a、7b)。图 7c 为面理和拉伸线理统计测量方位, 显示面理倾向南东, 倾角 30°左右, 拉伸线理平行于褶皱枢纽线理, 为倾向线理。

3.3 低角度韧性剪切带

沿着细粒块状片麻岩岩组 (Pt₂L₁) 与基性麻粒



a—S3、S1-2 及残留早期面理 S1；b—S3 平行于 S1 和 S2 叠加形成的复合变形面理

图 6 高温变质泥质片麻岩中发育的不同期次变形面理 (S1、S1-2 及 S3)

Fig. 6 Deformation foliations (S1, S1-2, and S3) developed in the high-temperature metamorphic pelitic gneiss

(a) S3, S1-2 and residual early foliation S1; (b) S3 is parallel to the composite foliation formed by the superimposition of S1 and S2



a—拉伸线理；b—剪切褶皱；c—变形面理、线理赤平投影

图 7 条带状混合片麻岩和泥质长英质片麻岩中发育的顺层褶皱 (进步站)

Fig. 7 Bedding folds developed in banded migmatitic gneiss and pelitic-quartzofeldspathic gneiss in the Progress Station

(a) Straching lineation; (b) Shearing folds; (c) Stereographic projection of deformation foliation and lineation

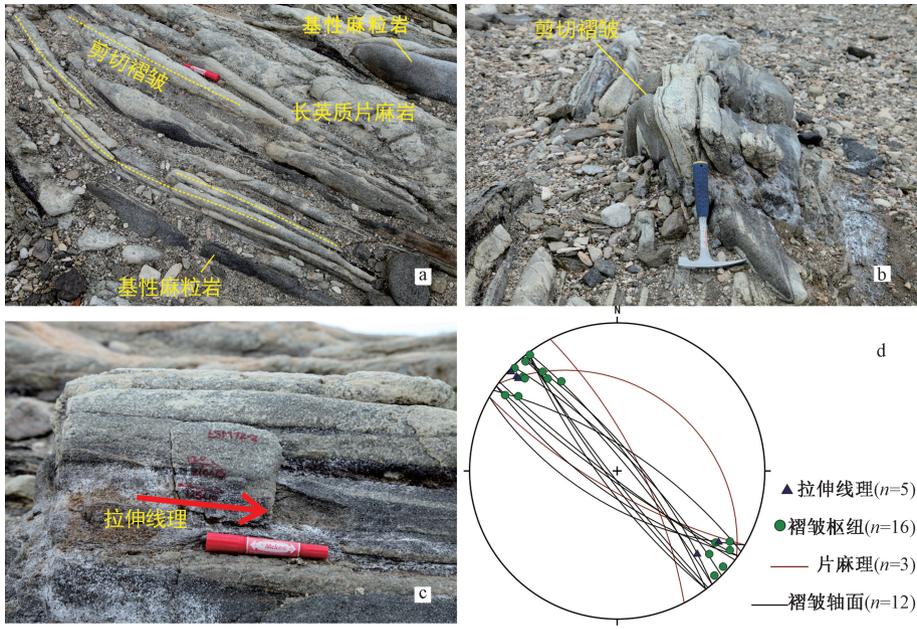
岩岩组 (Pt_2L_2) 界线附近及基性麻粒岩岩组 (Pt_2L_2) 分布的位置发育低角度韧性剪切变形 (D4; 图 5), 形成一系列轴向近水平、轴面近直立的 A 型褶皱群, 褶皱轴与变形岩石中拉伸线理方向一致 (图 8)。基性麻粒岩层位稳定, 但厚度变化较大, 常常呈大小不等的透镜状残留。剪切带之下细粒块状片麻岩岩组 (Pt_2L_1) 中发育平行剪切带的低角度剪切深熔脉体, 脉体平直, 一般宽度 1~3 cm, 间距 20~40 cm。褶皱轴面走向北西—南东向, 拉伸线理平行于褶皱枢纽线理, 近水平, 倾伏角小于 10° (图 8d)。因此这个剪切带上发育的剪切褶皱群有一系列 A 型褶皱构成。剪切带上盘泥质长英质片麻岩顺片理发育的紧闭褶皱及各种不规则流变褶皱。

泥质长英质片麻岩与混合片麻岩中, 矿物线理主要由矽线石、长石、黑云母等柱状、片状矿物, 以及拉长的长英质矿物集合体定向排列形成 (图 9)。基性麻粒岩中, 矿物线理主要由角闪石、辉石及长石等矿物定向排列形成。经过统计测量, 线理倾伏向南南东, 倾伏角小于 30° (图 7c)。有

时可见深熔作用导致麻粒岩相变质岩破裂成构造角砾岩状, 浅色脉体沿破裂处贯入。大致同时期, 受南南西—北北东向挤压作用控制, 在海珠半岛—华西半岛及斯图尔内斯半岛等地形成了中厚层状含辉石石榴黑云斜长片麻岩 (Pt_2L_6) 为核部的北北东向斜构造, 顺褶皱轴部有花岗岩体侵位。之后被晚期北北东向褶皱叠加, 形成典型的穹状叠加构造 (图 5)。

低角度韧性剪切变形之后, 平行于剪切带发生强烈的混合岩化作用, 在拉斯曼丘陵地区中西部斯图尔内斯半岛、五岳半岛及九龙半岛等地, 混合岩化作用导致先前变质地层呈残留状, 但地层的层序基本保持, 混合岩化作用也主要发生在条带状混合岩化含辉石石榴矽线黑云斜长片麻岩中, 属于混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt_2L_5)。

拉斯曼丘陵地区大部分位置岩石的片麻理产状较陡, 在同一地点平面上观察, 一些轴面陡倾的不对称褶皱常常指示相反的剪切指向, 造成一种矛盾的结果。但在产状相对平缓的地区, 比如

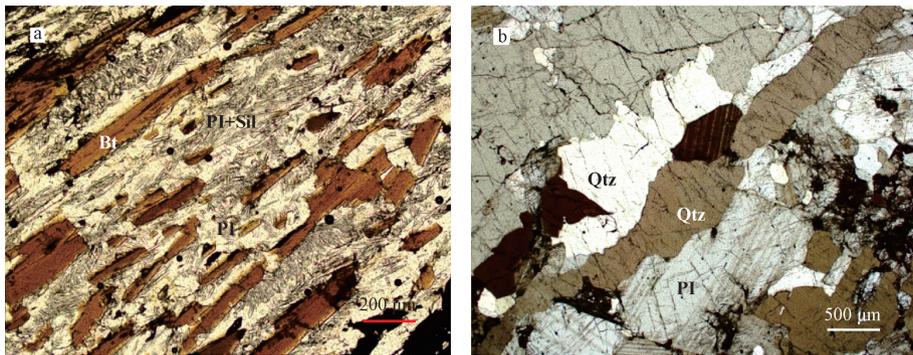


a、b—平行于低角度韧性剪切带的 A 型褶皱轴，深色岩石为碱性麻粒岩，浅色岩石为泥质长英质片麻岩；c—变形岩石中发育的拉伸线理平行于褶皱轴；d—剪切带中面理与线理投影

图 8 中山站附近低角度韧性剪切带内发育的 A 型褶皱群

Fig. 8 A-type fold group developed in a low angle ductile shear zone near the Zhongshan Station

(a and b) The A-type fold parallel to the extensional lineation in the low angle ductile shear zone (The dark rock is mafic granulite, and the light rock is pelitic-quartzofeldspathic gneiss); (c) The extensional lineation developed in the deformed rock is parallel to the fold axis; (d) Polar stereographic projection of foliation and lineation in the shear zone



Qtz—石英；Pl—斜长石；Bt—黑云母；Sil—矽线石

a—富矽线石黑云斜长片麻岩中片柱状矿物强烈定向；b—韧性变形的长英质浅色脉体，石英与斜长石塑性变形呈长条状

图 9 剪切变形带中泥质长英质片麻岩矿物定向组构

Fig. 9 Mineral oriented fabric of pelitic-quartzofeldspathic gneiss in ductile shear zone

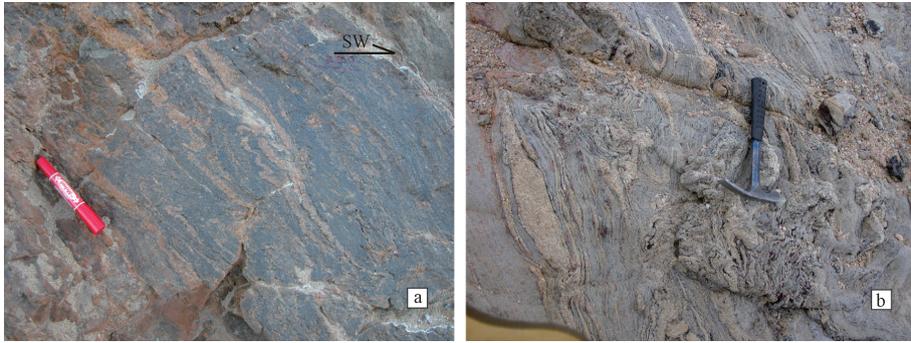
(a) Schistose and columnar minerals are strongly oriented in biotite plagioclase gneiss rich in sillimanite; (b) Ductile deformed granitic leucosome veins, in which quartz and plagioclase are plastically deformed into strips

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Sil—sillimanite

进步站一带，也发育顺片麻理的紧闭掩卧褶皱，即强烈的顺片麻理剪切褶皱（图 10a）。剖面上，进步站及中山站两地都显示顶向南南西方向的下滑（图 10b）。滑动方向应该是岩石中拉伸线理的倾伏方向。

3.4 D5 期脆性破裂变形及晚期花岗岩脉侵入

拉斯曼丘陵地区多处发育不规则的脆性破裂变形，表现为麻粒岩相变质岩破裂成构造角砾岩状，或者碎裂岩状。角砾岩块规模不等，几 cm 到几 m，甚至更大。岩块形状多为角砾状、棱角状，



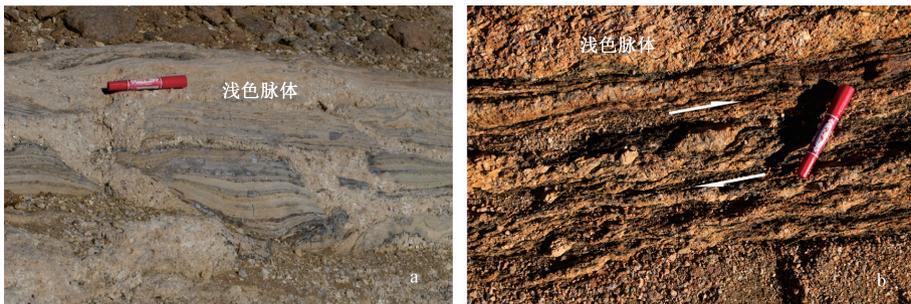
a—条带状混合片麻岩；b—泥质长英质片麻岩

图 10 拉斯曼丘陵条带状混合片麻岩和泥质长英质片麻岩中顺层褶皱 (进步站)

Fig. 10 Bedding folds in the banded migmatitic gneiss and pelitic-quartzofeldspathic gneiss near the Progress Station in the Larsemann Hills
(a) Banded migmatitic gneiss; (b) Pelitic-quartzofeldspathic gneiss

或者不规则角砾状，相邻角砾之间往往具有可以拼贴的边界。碎裂变形带的延伸不稳定，从中山站东南高地碎裂带出露的情况看，很可能具有低角度面状分布的特点。沿着这些破裂带有晚期浅

色混合花岗质脉体贯入并将角砾岩块胶结起来，花岗质脉体没有变形，矿物也没有定向分布特征，表明贯入时不存在定向性很强的构造应力场的作用 (图 11a)。



a—沿脆性破裂贯入的浅色脉体；b—剪切变形的深熔浅色脉体

图 11 浅色混合花岗质脉体沿泥质长英质片麻岩的脆性破裂贯入

Fig. 11 Leucosome veins injected along the brittle fractures of pelitic-quartzofeldspathic gneiss
(a) Leucosome veins injected along the brittle fractures; (b) Shear deformed leucosome veins

中山站附近的晚期浅灰白色块状粗粒、伟晶状石榴 (或含石榴子石) 黑云母花岗岩，主要矿物为长石和石英，黑云母含量一般小于 15%。明显切穿了上述长英质片麻岩的片麻理，尤其是在接触处未见二者岩性的过渡以及由岩体侵位造成的成分混染及交代现象。混合花岗质脉体的延伸很不稳定，或者说很少见到沿一个方向延伸超过 2 m 的脉体，而它们的延伸以及与片麻理的明显切割关系显示，浅色花岗岩脉体是沿片麻岩发育的张性破碎带的裂隙贯入的。有时可以见到沿混合花岗质脉体发生韧性剪切变形 (图 11b)。

3.5 晚期高角度正断层与近南北向密集破劈理 (D6)

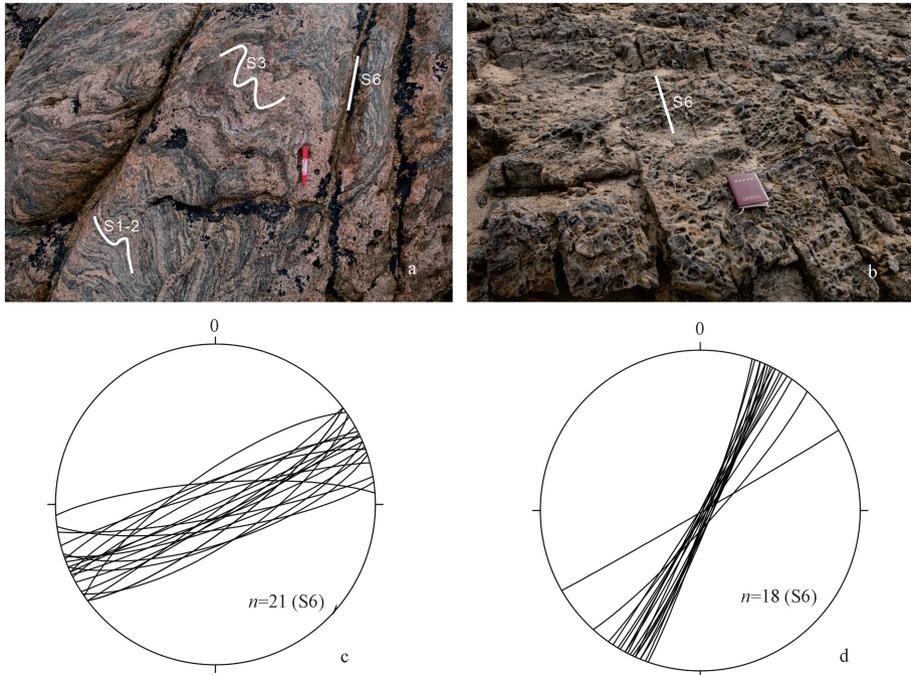
卫星遥感影像清楚地显示，拉斯曼丘陵地区东部几个半岛及期间海湾的边界呈西北—西北西

走向的笔直陡崖，西部斯图尔内斯半岛、九龙半岛及五岳半岛等的边界是近南北向笔直延伸的陡崖 (图 2)。这种地貌特征一般都是高角度正断层导致的，因此认为拉斯曼丘陵地区存在一期走向西北—西北西向及近北南向的正断层，它们切割了拉斯曼丘陵地区变质杂岩单元及早古生代花岗岩体。此外，拉斯曼丘陵地区还发育一组近直立的北东—北北东走向破劈理，将先前各期变形构造切穿 (S6; 图 12)。

4 讨论

4.1 拉斯曼岩群时代及层序

目前还没有确切的拉斯曼岩群形成时代的研



a、b—晚期北东—北北东向密集破劈理；c、d—晚期变形面理的赤平投影图（下半球投影）

图 12 拉斯曼岩群晚期变形面理 (S6)

Fig. 12 Late deformation foliation (S6) of the Larsemann Group

(a and b) Late dense cleavage in NE-NNE trending; (c and d) Stereographic projection of late deformation foliation (Lower hemisphere projection)

究结果, 但是拉斯曼丘陵主要变质与岩浆作用的年代已有很多资料。相应的地质事件已经获得了比较准确的同位素年龄: ①拉斯曼丘陵地区经历了两期变质作用, 早期变质时代为 1000~900 Ma (Tong et al., 1998, 2006, 2014) 峰期变质作用的年代为 541~534 Ma (赵越等, 1993; Zhang et al., 1996; Fitzsimons, 1997); ②根据变质作用研究, 混合岩化浅色脉体的出现应该略晚于峰期变质作用时代, 所以峰期变质作用的年代构成了 D2 期构造变形时代下限; ③已有研究已经获得了很多进步花岗岩的同位素年龄, Carson et al. (1996) 获得的两组锆石 U-Pb 年龄分别是 514 ± 7 Ma 和 516 ± 7 Ma。

文中对拉斯曼岩群变质岩做了一些碎屑锆石分析测试, 试验在中国地质调查局天津地调中心完成。测试结果显示, 6 个样品中均有相当数量的锆石落在不一致线上, 其上交点年龄在 1162~1014 Ma, 下交点年龄在 510~450 Ma 之间 (图 13)。因此, 文中将拉斯曼岩群的时代置于中元古代。

此外, 关于拉斯曼丘陵地区的这套变质杂岩的层序还有待进一步的工作, 文中研究结论主要来自于拉斯曼丘陵地区地质图图面反映出来的实

际岩石地层序列 (胡健民等, 2021)。当然, 这也是一个复杂变质岩区恢复建立变质杂岩层序的最重要一步。在拉斯曼丘陵地区米洛半岛东部、斯图尔内斯半岛及布洛克内斯半岛南部等地存在复合正片麻岩, 由于强烈的变质变形作用的改造, 均已成为层状, 已经难以恢复侵入岩体原始产状。如果这些正片麻岩的原岩是火山熔岩, 那么它应该也是拉斯曼岩群的一部分, 所以也是拉斯曼岩群所建层序的组成部分。因此, 研究查明拉斯曼岩群的组成、建立符合实际情况的层序, 应该还需要进一步深入的研究工作。

4.2 变形时代

(1) 拉斯曼丘陵地区区域性主变形面理为格林维尔期与泛非期构造热事件形成的复合型变形面理。由于格林维尔期变形面理呈残留状, 但是由于后来 D2~D4 期构造变形的强烈叠加, 以及同构造期混合岩化深熔脉体对先前以片麻理为代表的变形面理的强烈改造, 使得除片麻理之外的 D1 期变形的其他构造行迹很难鉴别。目前一般认为 D1 变形发生于格林维尔期构造事件, 但对于 D1 期变形构造的运动学指向问题没有明确的研究结果。

(2) 目前所见到主变形面理很可能主要是普

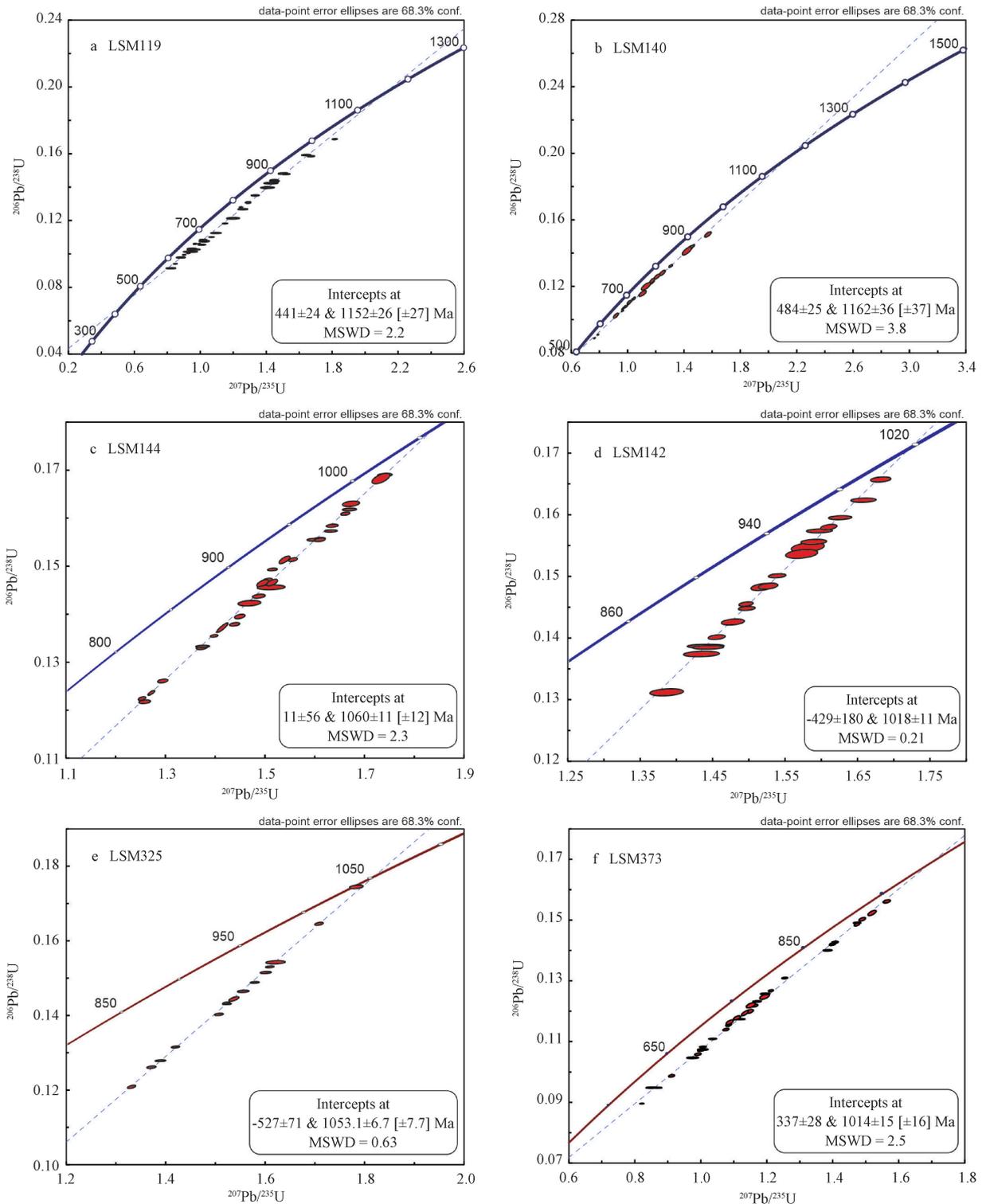


图 13 样品 LSM119、LSM140、LSM144、LSM142、LSM325 和 LSM373 锆石测年结果

Fig. 13 Zircon dating results of the samples LSM119, LSM140, LSM144, LSM142, LSM325 and LSM373

里兹造山带最初碰撞过程的记录 (D2)。根据对构成片麻理的矿物组合的研究, 确定其为拉斯曼丘陵地区峰期变质矿物组合, 属于高温麻粒岩相环境下的变形产物。

D3~D4 期变形是一次持续时间相对较长的递

进变形过程, 在这一过程中岩石发生顺层混合岩化形成顺片麻理的浅色脉体及浅肉红色花岗质混合岩化脉体 (D3), 大体同时或之后形成低角度韧性剪切变形带及复杂的不规则状流变褶皱, 以及各种紧闭的不对称剪切褶皱 (D4)。根据变形构造

行迹与混合岩化作用之间的关系,确认 D3~D4 期变形主要发生在混合岩化阶段。在片麻理产状较为平缓的地区统计测得的拉伸线理向南南东—南南西方向缓倾伏,可能指示了造山带晚期的伸展变形阶段,麻粒岩相变质底层,如西福尔丘陵太古宙变质地体,沿着这个低角度韧性变形带被抬升到近地表。

现有的地质证据可以清楚地限定 D2 期变形的时间: D3~D4 期构造变形的变形面理是区域变质作用形成的片麻理,该片麻理的变质作用研究结果认为其是峰期变质作用形成的 (Carson et al., 1995); D2 期变形是拉斯曼丘陵地区峰期变质作用之后区域混合岩化作用过程的同变质变形过程:大量的混合岩化浅色脉体及泥质长英质片麻岩、基性麻粒岩等发生低角度韧性剪切变形及同步流变褶皱变形,是变形发生在混合岩化阶段的最好证据;进步花岗岩切穿混合岩化泥质长英质片麻岩及混合片麻岩的片麻理及混合岩化浅色脉体,进步花岗岩是 D2 期变形的时间上限,因此变形时代在 550~515 Ma 左右。

(3) D5 期变形为混合岩化长英质片麻岩发生脆性破裂,形成复杂的角砾状岩块,这些角砾状岩块被浅色花岗质脉体贯入,浅色脉体的时代为 497 Ma 左右。因此,这次变形应该发生在 510~497 Ma 左右。角砾状岩块的产状目前还不是很清楚,但根据其在中山站一带的产出特征,它很可能代表一个近水平或低角度的脆性破裂带,是 D2 期低角度顺层韧性剪切变形带在近地表叠加的脆性变形带。它的意义在于将沿低角度韧性剪切变形带抬升到地壳浅部的麻粒岩相变质地体继续抬升到近地表。碰撞后造山带地壳处于拉伸状态,麻粒岩相长英质片麻岩已经位于近地表位置,而深部的深熔作用继续进行。D3 期深熔作用发生在岩石圈张性过程,且发生深熔作用的物质也比上述片麻岩主变质期时的原岩酸性程度要高,或者其深熔分异作用较为彻底,侵位上来的花岗质脉体暗色矿物含量很少。

(4) 由米洛半岛轴向北北西向褶皱解析出来的 D5 期变形,它所代表的北西南东向挤压变形区域上的构造意义有待进一步揭示。中山站地区地质图清楚地显示早期北北西向褶皱被晚期北东东向褶皱叠加,形成比较典型的穹状叠加构造 (图 2, 图 5)。这一期叠加褶皱在拉斯曼丘陵中西部的

海珠半岛—华西半岛及斯图尔内斯半岛等地分别形成了以上部深灰色、灰褐色中厚层状含辉石石榴子石黑云母斜长片麻岩段为核部的北东东向紧闭向斜构造 (图 2)。顺褶皱轴部侵位有与进步花岗岩类似的花岗岩体。

(5) D6 期高角度正断层及近直立的北东—北北东向密集破碎理很可能记录了兰伯特裂谷形成过程中区内所受到的拉张破坏 (陈宣华等, 2007)。也可能代表拉斯曼丘陵地区受到了侧向剪切作用,有两种可能:①由查尔斯王子山太古宙变质地体与西福尔丘陵太古宙变质地体的相对水平错动造成;②由查尔斯王子山及西侧格罗夫山地区的垂向抬升造成的垂向剪切作用形成。

5 结论

(1) 拉斯曼丘陵地区变质杂岩主体以副变质岩为主,成层有序。根据变质杂岩组合的差异,自上而下可以划分含辉石长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₆)、混合岩化石榴黑云长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₅)、磁铁矿化泥质长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₄)、混合岩化长英质片麻岩岩组 (Pt₂L₃)、基性麻粒岩岩组 (Pt₂L₂)、细粒块状片麻岩岩组 (Pt₂L₁),文中将发育在拉斯曼丘陵地区的变质杂岩称之为拉斯曼岩群 (Pt₂L)。

(2) 根据已获得的同位素年龄资料、文中获得的碎屑锆石年龄分布特征,以及变质—岩浆事件研究成果,将拉斯曼岩群的时代确定为中元古代。

(3) 拉斯曼丘陵地区总体构造走向为北东—北东东向,为一个区域性紧闭复式向斜构造,向斜轴向北东—北东东方向翘起;在拉斯曼丘陵东部米洛半岛一带,保留了早期轴向北北西方向的褶皱,以及拉伸方向为北北东方向、沿着基性麻粒岩岩组与下伏块状细粒片麻岩岩组界面附近发育的低角度韧性剪切带。

(4) 拉斯曼丘陵地区经历了两次重要的变质—岩浆—变形事件,记录了 6 次构造变形。D1: 格林尔期区域变质作用及区域性片麻理; D2~D4: 泛非期变质—变形及顺层混合岩化、复合型区域片麻理形成、进步花岗岩浆侵位、低角度韧性剪切变形; D5: 北西—南东方向挤压作用及轴向北东东向紧闭褶皱形成; D6: 脆性破裂和高角度正断层等。

致谢：野外填图过程中得到中国第29次南极科学考察队及曲探宙领队、中山站站站长张北辰研究员和第29次南极考察越冬队全体队员以及度夏队王连仲、刘婷婷、何红昂等队员的大力支持和帮助，其中越冬队邓德迎、杨升高、袁乐先、田忠翔等参加了野外填图，在此致以诚挚的谢意。

References

- AN M J, WIENS D A, ZHAO Y, et al., 2015. S-velocity model and inferred Moho topography beneath the Antarctic Plate from Rayleigh waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (1): 359-383.
- BLACK L P, HARLEY S L, SUN S S, et al., 1987. The Rayner complex of East Antarctica: complex isotopic systematics within a Proterozoic mobile belt [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 5 (1): 1-26.
- BOGER S D, WILSON C J L, FANNING C M, 2001. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: the final suture between East and West Gondwana? [J]. *Geology*, 29 (5): 463-466.
- CARSON C J, DIRKS P G H M, HAND M, et al., 1995. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. *Geological Magazine*, 132 (2): 151-170.
- CARSON C J, FANNING C M, WILSON C J L, 1996. Timing of the progress granite, Larsemann Hills: additional evidence for early Palaeozoic orogenesis within the East Antarctic shield and implications for Gondwana assembly [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43 (5): 539-553.
- CHEN X H, MA Z G., JIANG R B, et al., 2007. Apatite fission track thermochronology of Cenozoic exhumation in Larsemann Hills, East Antarctica. *Earth Science Frontiers*, 14 (4): 175-188 (in Chinese with English Abstract).
- DIRKS P G H M, HAND M, 1995. Clarifying temperature-pressure paths via structures in granulite from the Bolingen Islands, Antarctica [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42 (2): 157-172.
- FITZSIMONS I C W, HARLEY S L, 1991. Geological relationships in high-grade gneiss of the Brattstrand Bluffs coastline, Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38 (5): 497-519.
- FITZSIMONS I C W, 1997. The Brattstrand paragneiss and the Sostrene orthogneiss: a review of Pan-African metamorphism and Grenvillian relics in southern Prydz Bay [M] //RICCI C A. The antarctic region: geological evolution and processes; proceedings of the 7th international symposium on antarctic earth sciences. Siena, Italy: Terra Antarctica Publication; 121-130.
- FITZSIMONS I C W, 2000. Grenville-age basement provinces in East Antarctica: evidence for three separate collisional orogens [J]. *Geology*, 28 (10): 879-882.
- GREW E S, CARSON C J, CHRISTY A G, et al., 2012. New constraints from U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotopic data on the timing of sedimentation and felsic magmatism in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 206-207: 87-108.
- HENSEN B J, ZHOU B, 1995. A Pan-African granulite facies metamorphic episode in Prydz Bay, Antarctica: evidence from Sm-Nd garnet dating [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42 (3): 249-258.
- HENSEN B J, ZHOU B, THOST D E, 1997. Recognition of multiple high grade metamorphic events with garnet Sm-Nd chronology in the northern Prince Charles Mountains, Antarctica [M] //RICCI C A. The antarctic region: geological evolution and processes. Siena; Terra Antarctica Publication; 97-104.
- HU J M, LIU X C, ZHAO Y, et al., 2008. Advances in the study of the orogeny and structural deformation of Prydz Tectonic Belt in East Antarctica. *Acta Geoscientica Sinica* 29, 343-354 (in Chinese with English Abstract).
- HU J M, WANG W, LIU X C, et al., 2021. Geological map of the Larsemann Hills in East Antarctica (1:25000). Beijing: Science Press. (in Chinese)
- JACOBS J, FANNING C M, HENJES-KUNST F, et al., 1998. Continuation of the Mozambique belt into East Antarctica: Grenville-age metamorphism and polyphase Pan-African high-grade events in central Dronning Maud Land [J]. *Journal of Geology*, 106 (4): 385-406.
- KELSEY D E, WADE B P, COLLINS A S, et al., 2008. Discovery of a Neoproterozoic basin in the Prydz belt in East Antarctica and its implications for Gondwana assembly and ultrahigh temperature metamorphism [J]. *Precambrian Research*, 161 (3-4): 355-388.
- LI M, LIU X C, ZHAO Y, et al., 2007. Zircon U-Pb ages and geochemistry of granitoids from Prydz Bay, East Antarctica, and their tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 1055-1066 (in Chinese with English Abstract).
- LIU X C, JAHN B M, ZHAO Y, et al., 2006. Late Pan-African granitoids from the Grove Mountains, East Antarctica: age, origin and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 145 (1-2): 131-154.
- LIU X C, JAHN B M, ZHAO Y, et al., 2007a. Geochemistry and geochronology of high-grade rocks from the Grove Mountains, East Antarctica: evidence for an Early Neoproterozoic basement metamorphosed during a single Late Neoproterozoic/Cambrian tectonic cycle [J]. *Precambrian Research*, 158 (1-2): 93-118.
- LIU X C, ZHAO Y, ZHAO G C, et al., 2007b. Petrology and geochronology of granulites from the McKaskle Hills, Eastern Amery Ice Shelf, Antarctica, and implications for the evolution of the Prydz Belt [J]. *Journal of Petrology*, 48 (8): 1443-1470.
- LIU X C, ZHAO Y, SONG B, et al., 2009. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of high-grade rocks and charnockites from the Eastern Amery Ice Shelf and southwestern Prydz Bay, East Antarctica: constraints on Late Mesoproterozoic to Cambrian tectonothermal events related to supercontinent assembly [J]. *Gondwana Research*, 16 (2): 342-361.
- LIU X C, ZHAO Y, HU J M, 2013. The *c*, 1000 ~ 900 Ma and *c*.

- 550~500 Ma tectonothermal events in the Prince Charles Mountains-Prydz Bay region, East Antarctica, and their relations to supercontinent evolution [M] // HARLEY S L, FITZSIMON I C W, ZHAO Y. Antarctica and supercontinent evolution. Geological Society, London, Special Publication, 383 (1): 95-112.
- LIU X. H., ZHAO Y, LIU X C, et al., 2003. Geology of the Grove Mountains in East Antarctica—new evidence for the final suture of Gondwana Land. *Sci. China (Ser. D)*, 46, 305-319.
- MEERT J G, VAN DER VOO R, 1997. The assembly of Gondwana 800~550 Ma [J]. *Journal of Geodynamics*, 23 (3-4): 223-235.
- SHERATON J W, BLACK L P, MCCULLOCH M T, 1984. Regional geochemical and isotopic characteristics of high-grade metamorphics of the Prydz Bay area: the extent of proterozoic reworking of Qrchaean continental crust in East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 26 (2): 169-198.
- SHIRAIISHI K, ELLIS D J, HIROI Y, et al., 1994. Cambrian orogenic belt in East Antarctica and Sri Lanka: implications for Gondwana assembly [J]. *Journal of Geology*, 102 (1): 47-65.
- STÜWE K, POWELL R, 1989. Low-pressure granulite facies metamorphism in the Larsemann Hills area, East Antarctica; petrology and tectonic implications for the evolution of the Prydz Bay area [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 7 (4): 465-483.
- TINGEY R J, 1981. Geological investigations in Antarctica 1968-1969: the Prydz Bay-Amery Ice Shelf-Prince Charles Mountains area [R]. Canberra: Commonwealth of Australia (Geoscience Australia).
- TONG L X, LIU X H, ZHANG L S, et al., 1998. The ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of hornblendes in Grt-Pl-bearing amphibolite from the Larsemann Hills, East Antarctica and their geological implications [J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 9 (2): 79-91.
- TONG L X, WILSON C J L, 2006. Tectonothermal evolution of the ultrahigh temperature metapelites in the Rauer Group, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 149 (1-2): 1-20.
- TONG L X, LIU X H, WANG Y B, et al., 2014. Metamorphic P-T paths of metapelitic granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. *Lithos*, 192-195: 102-115.
- WANG Y B, LIU D Y, CHUNG S L, et al., 2008. SHRIMP zircon age constraints from the Larsemann Hills region, Prydz Bay, for a late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic tectono-thermal event in East Antarctica [J]. *American Journal of Science*, 308 (4): 573-617.
- WILSON T J, GRUNOW A M, HANSON R E, 1997. Gondwana Assembly: the view from Southern Africa and East Gondwana [J]. *Journal of Geodynamics*, 23 (3-4): 263-286.
- YOSHIDA M, 1995. Cambrian orogenic belt in East Antarctica and Sri Lanka: implications for Gondwana assembly: a discussion [J]. *Journal of Geology*, 103 (4): 467-468.
- YOSHIDA M, JACOBS J, SANTOSH M, et al., 2003. Role of pan-african events in the circum-East antarctic orogen of East gondwana: a critical overview [M] // YOSHIDA M, WINDLEY B F, DASGUPTA S. Proterozoic East gondwana; supercontinent assembly and breakup. Geological Society, London, Special Publications, 206 (1): 57-75.
- ZHANG L S, TONG L X, LIU X H, et al., 1996. Conventional U-Pb age of the high-grade metamorphic rocks in the Larsemann Hills, East Antarctica [M] // PANG Z H. Advances in solid earth science. Beijing: Science Press: 27-35.
- ZHAO Y, SONG B, WANG Y B, et al., 1992. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica [M] // YOSHIDA Y, KAMINUMA K, SHIRASHI K. Recent progress in antarctic earth science. Tokyo: Terra Scientific Publishing: 155-161.
- ZHAO Y, SONG B, ZHANG Z Q, et al., 1993. Early Paleozoic (Pan-Africa) thermal event of the Larsemann Hills and its neighbours Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Sciences in China (Series B)*, 38 (1): 74-84.
- ZHAO Y, LIU X H, SONG B, et al., 1995a. Constraints on the stratigraphic age of metasedimentary rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica: possible implications for Neoproterozoic tectonics [J]. *Precambrian Research*, 75 (3-4): 175-188.
- ZHAO Y, SONG B, ZHANG Z Q, et al., 1995b. Early paleozoic (Pan African) thermal event of the Larsemann Hills and its neighbours, Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Science in China. Series B, Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences*, 38 (1): 74-84.
- ZHAO Y, LIU X H, LIU X C, et al., 2003. Pan-African events in Prydz Bay, East Antarctica, and their implications for East Gondwana tectonics [M] // YOSHIDA M, WINDLEY B F, DASGUPTA S. Proterozoic East gondwana; supercontinent assembly and breakup. Geological Society, London, Special Publications, 206 (1): 231-245.

附中文参考文献

- 陈宣华, 马宗晋, 蒋荣宝, 等, 2007. 拉斯曼丘陵新生代剥露作用的裂变径迹证据 [J]. *地学前缘*, 14 (4): 175-188.
- 胡健民, 刘晓春, 赵越, 等, 2008. 南极普里兹造山带性质及构造变形过程 [J]. *地球学报*, 29 (3): 343-354.
- 胡健民, 王伟, 刘晓春, 等, 2021. 东南极拉斯曼丘陵地区地质图 (1:25000) [M]. 北京: 科学出版社.
- 李森, 刘晓春, 赵越, 2007. 东南极普里兹湾地区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 23 (5): 1055-1066.
- 赵越, 宋彪, 张宗清, 等, 1993. 东南极拉斯曼丘陵及其邻区的泛非热事件 [J]. *中国科学 (B)*, 23 (9): 1000-1008.