

南极大陆边缘 形成演化与资源效应

Tectonic Evolution of the Antarctica Continental
Margin and its Effect on Natural Resources

丁巍伟 尹希杰 梁瑞才 董崇志

王春阳 赵阳慧 裴彦良

著



海洋出版社

南极大陆边缘 形成演化与资源效应

Tectonic Evolution of the Antarctica Continental
Margin and its Effect on Natural Resources

丁巍伟 尹希杰 梁瑞才 董崇志

王春阳 赵阳慧 裴彦良

著

海洋出版社

2018年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

南极大陆边缘形成演化与资源效应 / 丁巍伟等著.
— 北京 : 海洋出版社, 2018.4
ISBN 978-7-5210-0093-1

I. ①南… II. ①丁… III. ①南极—大陆边缘—地质
演化—研究 IV. ①P941.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第077407号

责任编辑: 王 溪
责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京文昌阁彩色印刷有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷

开本: 889 mm × 1194 mm 1 / 16 印张: 16

字数: 400千字 定价: 138.00元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

序 言

南极洲是人类征服的最后一块大陆，遥远而又冰封，也是地球上地质、地球物理调查研究最为薄弱的一块大陆。南极洲大陆边缘更是地学界一直试图探索的最后的区域目标，所知甚少，蕴含着诸多独特的前沿科学问题，不仅是研究中生代冈瓦裂解、板块俯冲碰撞以及弧后盆地形成的天然地质实验室，也是研究新生代以来冰川运动、洋流以及气候变化的关键场所，对于板块运动和大陆边缘动力学的研究具有重要的科学意义。随着科学技术的发展和探索南极热情的高涨，自20世纪50年代以来，国际地学界克服特殊、严酷的自然地理条件，开始系统地描绘南极大陆边缘形成、演化及其资源环境效应的历史画卷。2012年，为深化对南极洲资源环境的科学认识，国家海洋局启动了“南北极环境综合考察与评估”国家专项，从此拉开了我国自主、系统研究南极大陆边缘的序幕。

《南极大陆边缘形成演化与资源效应》正是在国家海洋专项“南北极环境综合考察与评估”之“南极周边海域矿产资源潜力调查与评估”课题支持下多年研究的系统总结。该专著以近年来南极周边海域海洋地质与地球物理的国际考察资料为基础，结合我国在威德尔海—南极半岛外缘海域、普里兹湾、罗斯海区的专项地质与地球物理调查，以及我国南极一船两站走航海洋地球物理调查获取的包括重力、磁力、海底热流、沉积底质在内的地质与地球物理数据综合研究编著而成。该专著分区域对西北极普里兹湾、南极半岛东缘、南极半岛西缘，东南极威尔克斯地—阿德利地和罗斯海的大陆边缘的地质构造、地壳结构、张裂演化和油气富集进行了总结论述，并就南极大陆边缘形成演化对资源形成的效应进行了系统总结，增强了实用性和可读性。

该专著是国际南极陆缘研究和我国专项调查成果的最新总结，有助于深化对南极大陆边缘动力学及其资源环境效应等科学问题的认识，吸引更多青年学者投身南极研究事业，为科学探索南极、和平利用南极作出更大的贡献。



2018年3月1日

前言

南极洲是世界最寒冷的一块大陆，地处酷寒，98%的面积被冰雪覆盖；也是最高的大陆，平均海拔高度为2350m。由于它所处的特殊地理、地质位置和独特的自然条件，对它的地质研究程度相比其他大陆最低。南极洲是地球整个圈层，包括岩石圈、大气圈、生物圈和水圈在内极其重要的一部分，它在冈瓦纳大陆裂解和全球现今构造格局形成中的重要作用；它的冰川作用对陆缘沉积及全球气候的影响；绕南极环流对全球海洋温、盐交换的影响；南极洲独特的生物资源及生态环境，而且南极洲的陆地和陆缘也蕴含着包括固体金属矿产和油气资源在内的丰富资源。因此，南极洲在自然资源和科学研究上具有无可估量的价值与潜力，研究程度低，也意味着具有更多的惊喜等待我们去发现。

国际科学界对于南极洲的研究源于20世纪，包括前仆后继的探险者用生命铺垫的开拓和发现工作。大规模而系统的与地球物理相关研究工作源于1957—1958年“国际地球物理年计划”开始实施之后，地质与地球物理探测相结合的研究工作取得了长足的进展（陈廷愚等，2008）。自此之后各个国家在南极洲广大地区开展了包括人工地震、重力、磁力、遥感和GPS测量在内的大量调查研究工作，获取了大量的地质与地球物理数据，极大地增进了对南极洲陆内和陆缘构造变形、岩浆作用、深部结构、沉积地层等信息的了解。至今各国在南极洲已经建有60多个观测站和100多个考察基地。全球深部钻探计划（ODP）及其前身深海钻探计划（DSDP）在南极陆缘的普里兹湾区（ODP 119及ODP 188航次）、南极半岛东缘的威德尔海区（ODP 113航次）、南极半岛西部陆缘（DSDP 325航次及ODP 178航次）开展的钻探工作提供了南极陆缘区地层的时代、岩性、物性等在内的精准信息。据2014—2015年在美国地球物理年会（AGU）获取的信息，目前对南极洲的地质与地球物理工作主要向内陆挺进，尤其是在内陆布设大量的地震台站以获取南极洲深部地壳的信息，同时在内陆区开展钻探技术，目前欧美已经开始研发能钻透冰层获取底部岩芯的小型钻机，为获取南极洲内陆基底岩性提供了可能性。

中国对南极的科学考察工作始于1984年的南大洋科考，并于1985年在南极半岛北端的南设得兰群岛乔治王岛建立了第一个南极考察站——长城站，之后又陆续建成了“中山站”“昆仑站”和“泰山站”。尤其是在南极冰穹A上建立的“昆仑站”使得中国对南极洲的考察挺进内陆。同时中国也自1984年之后开展了30

多次的南极科学考察，获取了大量的极地地球科学数据和样品，在地质与地球物理学、物理海洋学、冰川学、测绘学、大气科学、生物生态学等领域获得了重要的科学新发现，取得了一批高水平的科研成果。

板块陆缘是板块构造研究的重点区域，南极大陆边缘是全球非常独特的复合型大陆边缘。其东南极主要为被动陆缘，而西南极则发育了太平洋向南极洲俯冲的主动陆缘，包括洋壳俯冲和消亡、陆壳增生、沟弧盆体系形成、火山等众多地球科学问题均在此汇聚。更为重要的是南极陆缘并非均是冰川作用的沉积，在冰川作用之前，冈瓦纳大陆裂解时在南极陆缘形成了一系列的断陷盆地，并沉积了富含有机质的中生代海相地层。该套地层是全球油气的主要烃源岩，人们在与南极陆缘为被动陆缘的印度—斯里兰卡陆缘、澳大利亚陆缘及南美洲陆缘发现了丰富的油气资源，这也预示在南极陆缘蕴藏着丰富的油气和天然气水合物资源。研究与认识南极陆缘，不仅具有重要的科学意义，也是维护我国海洋权益不可分割的一部分，具有重大的战略意义。但由于条件所限，比如“雪龙”号并非专业的地球物理调查船，比如南极陆缘周边很多地区常年被冰川覆盖等等，以往我国在南极陆缘开展的地球物理工作非常少，且没有系统性。这均需要我们以南极大陆边缘为研究区，以地球物理探测、地球物理数据收集、整理和分析为手段，深入探索陆缘区的构造现象和构造变形特征，揭示南极陆缘演化的动力学机制及其控制因素，提升我们寻找资源的能力，也会对海洋科学诸多前沿领域产生巨大的推动作用。

因此，本书根据近年来在南极周边海域的海洋地质与地球物理考察资料，结合在威德尔海—南极半岛外缘海域、普里兹湾的专项地质与地球物理调查以及南极一船两站走航海洋地球物理调查获取的包括重力、磁力、海底热流、沉积底质在内的地质与地球物理数据，重点针对南极陆缘的普里兹湾及附近海域、南极半岛东缘的威德尔海及鲍威尔盆地区、南极半岛西缘陆架区、东南极威尔克斯地—阿德利地陆缘以及罗斯海陆缘的天然气水合物资源以及油气资源进行调查。通过对研究区大陆边缘盆地地质构造特征及形成演化、地壳结构及张裂过程以及沉积盆地油气富集成藏规律方面的研究，总结地质和矿产资源富集成藏控制因素，对矿产资源潜力进行评估，并初步圈定可能的远景区。

本书研究范围主要包括五个区域：东南极洲的普里兹湾区和威尔克斯地—阿德利地陆缘，西南极洲南极半岛东缘及威德尔海区，南极半岛西缘陆架区以及罗斯海陆缘区（图1）。这五个区域不仅是“南极周边海域环境综合考察与资源潜力评估”专题的重点研究区域，也是具有不同构造背景的区域，如普里兹湾和罗斯海为被动陆缘，南极半岛东缘及威德尔海区既有被动陆缘及边缘海盆，也有主动

陆缘,而南极半岛西缘则蕴含了洋陆碰撞—弧后扩张以及洋中脊俯冲的复杂信息。这些区域也是国际地学界研究的重点,各国已在这些区域进行了不少地质与地球物理调查。通过对这些数据的收集,结合我国南极地质与地球物理航次获取的最新数据,足以支撑对这些区域构造、沉积、深部结构以及资源潜力的研究。

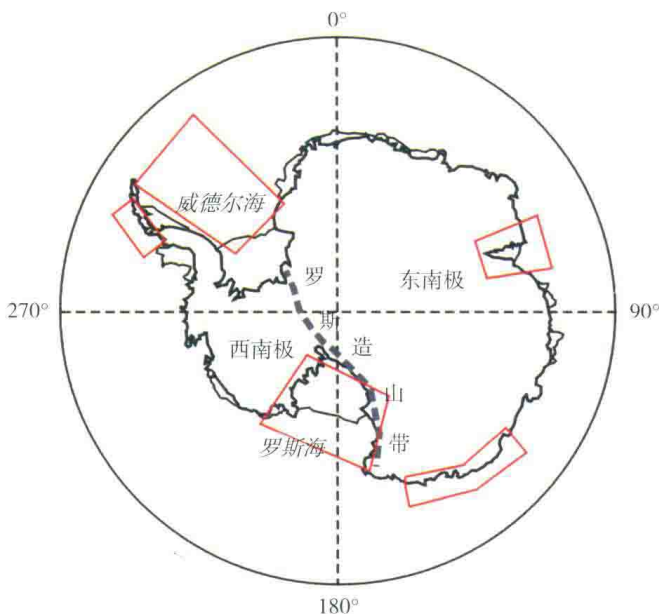


图1 南极陆缘研究区位置图(图中红框)

本书是南北极环境综合考察与评估专项成果之一,也是南极周边海域矿产资源潜力调查与评估项目组五年集体研究的结晶。项目组绝大多数研究人员积极参与了本书的各章节撰写,所涉及的资料不仅包括项目组获取的数据,同时也包括了撰写人自己掌握的大量宝贵数据。本书前言由丁巍伟执笔;第1章由丁巍伟、林秀斌执笔;第2章由丁巍伟、董崇志、梁瑞才、裴彦良执笔;第3章由董崇志、丁巍伟、梁瑞才、裴彦良执笔;第4章由董崇志、王春阳、梁瑞才、裴彦良执笔;第5章由王春阳、董崇志、裴彦良执笔;第6章由赵阳慧、董崇志、裴彦良执笔;第7章由丁巍伟、尹希杰执笔;第8章由尹希杰执笔。全书由丁巍伟汇总、统稿并修改、编辑完成。马乐天、程子华、方鹏高、丁航航协助编辑了本书。本书的出版得到了国家海洋局极地研究中心和国家海洋局极地专项办公室的大力支持,本书还得到了国家海洋局“全球变化与海气相互作用”专项“亚洲大陆边缘的深部过程及动力学机制”(GASI-GEOGE-01)、海洋公益性行业科研专项项目“外大陆架划界与国际海底资源关系评估辅助决策系统研制和示范应用(201205003)”的资助,在此一并致以衷心感谢。

编者
2017年7月

目次

第1章 南极洲区域地质概况及大地构造演化	1
1.1 区域地质概况	1
1.2 南极洲大地构造演化	2
1.2.1 前寒武纪	2
1.2.2 新元古代至早古生代泛非构造运动	3
1.2.3 二叠纪—三叠纪早期裂谷事件	4
1.2.4 侏罗纪以来冈瓦纳裂解	5
第2章 普里兹湾地质特征	9
2.1 地质概况	9
2.2 地球物理场特征及地壳结构	10
2.2.1 数据来源及方法	10
2.2.2 重力场特征	12
2.2.3 磁场特征及磁性基底反演	15
2.2.4 地壳结构特征	24
2.3 构造变形特征及沉积演化	31
2.3.1 数据来源	31
2.3.2 地层单元划分及地震反射特征	32
2.3.3 普里兹湾的构造变形特征与沉积演化	36
第3章 南极半岛东缘地质特征	41
3.1 地质特征概述	42
3.2 地球物理场特征与地壳结构	44
3.2.1 数据来源及方法	44
3.2.2 重力场特征	49
3.2.3 南极半岛磁力异常特征及磁性基底反演	52

3.2.4	南极半岛西缘地壳结构特征	62
3.3	构造变形 – 沉积特征及形成演化	64
3.3.1	威德尔海	64
3.3.2	鲍威尔盆地	71
第 4 章 南极半岛西缘地质特征		91
4.1	地球物理场特征与地壳结构	92
4.1.1	数据来源及方法	92
4.1.2	重力异常特征	98
4.1.3	磁力异常特征	98
4.1.4	地壳和上地幔的 P 波速度结构	107
4.2	南极半岛西缘大陆架新生代构造变形与沉积演化	114
4.2.1	地层单元划分	115
4.2.2	南极半岛西侧被动陆缘陆架区的构造变形特征	117
4.2.3	南极半岛陆架区构造单元划分	120
4.2.4	南极半岛西侧被动陆缘区构造沉积演化	122
第 5 章 东南极威尔克斯地 – 阿德利地陆缘地质特征		126
5.1	地球物理场特征	127
5.1.1	数据来源及方法	127
5.1.2	地球物理特征	128
5.2	构造变形及沉积特征	130
5.2.1	数据来源及方法	131
5.2.2	构造层序划分及地震反射特征	132
5.2.3	构造单元划分	135
5.2.4	威尔克斯地东西部及阿德利地陆缘构造变形特征的差异	136
5.2.5	COT 的岩浆作用	138
5.2.6	威尔克斯地 – 阿德利地陆缘构造变形差异的原因	139
第 6 章 罗斯海陆缘地质特征		142
6.1	地质背景	143
6.1.1	区域地质概况	143
6.1.2	区域岩浆活动	144
6.1.3	地震地层学研究	145

6.2 地球物理场特征	146
6.2.1 数据来源和方法	146
6.2.2 地球物理场特征	150
6.3 罗斯海盆地构造与沉积特征	154
6.3.1 数据来源与研究方法	154
6.3.2 罗斯海西部地层构造格架	155
6.3.3 罗斯海东部地层构造格架	159
6.3.4 罗斯海东—西部构造格架对比	162
6.4 罗斯海构造演化	165
6.4.1 裂陷一幕	165
6.4.2 裂陷二幕	165
6.4.3 热沉降期	167
6.4.4 构造再活化	167

第7章 南极陆缘重点区域油气地质特征 172

7.1 南极陆缘油气地质概况	172
7.1.1 南极半岛地区	173
7.1.2 罗斯海地区	173
7.1.3 威德尔海地区	174
7.1.4 东南极地区	175
7.2 普里兹湾区油气地质特征	176
7.2.1 沉积物来源和有机质成熟度(南极普里兹湾 739C 和 741A 钻孔冰川期和 白垩纪地层)	176
7.2.2 南极洲普里兹湾沉积物中的脂肪族碳氢化合物	183
7.2.3 油气资源潜力分析	190
7.3 南极半岛东缘油气地质特征	192
7.3.1 鲍威尔盆地及陆缘区	192
7.3.2 拉尔森盆地	194
7.3.3 毛德皇后地陆缘	203
7.4 南极半岛西缘油气地质特征	203
7.5 东南极威尔克斯地—阿德利地油气地质特征	204
7.6 罗斯海油气地质特征	204
7.6.1 地质条件	204
7.6.2 温压条件	205
7.6.3 烃类地化条件	206
7.6.4 油气资源潜力分析	206

7.7	南极陆缘区油气资源生成条件及有利区带分析	207
第 8 章	南极陆缘重点区域天然气水合物成藏条件及资源潜力评估	210
8.1	天然气水合物成藏条件概述	210
8.1.1	沉积条件	210
8.1.2	沉积特征	211
8.1.3	地质构造条件	212
8.1.4	海域天然气水合物成矿的热动力学条件	212
8.2	普里兹湾区天然气水合物资源潜力评估	213
8.2.1	天然气水合物的地震特征	213
8.2.2	普里兹湾海域水合物地球化学数据资料	213
8.3	南极半岛东缘南奥克尼群岛东南海域天然气水合物特征	222
8.3.1	南奥克尼群岛东南陆缘海域天然气水合物地球物理数据	222
8.3.2	南奥克尼群岛东南陆缘海域天然气水合物地球化学数据	223
8.3.3	南奥克尼群岛东南陆缘海域油气化学参数	226
8.3.4	南奥克尼群岛东南陆缘天然气水合物初步评价	226
8.4	南极半岛西缘南设得兰群岛海域天然气水合物特征	227
8.4.1	南设得兰群岛海域天然气水合物地球物理证据	228
8.4.2	南极半岛南设得兰群岛天然气水合物和游离气的估算	230
8.4.3	南设得兰群岛海域天然气水合物地球化学数据	231
8.4.4	南设得兰群岛海域陆缘天然气水合物初步评价	233
8.5	罗斯海陆缘天然气水合物资源和有利区带分析	235
8.5.1	南极罗斯海海底沉积物烃类气体含量	235
8.5.2	南极罗斯海海底沉积物孔隙水化学参数	236
8.5.3	南极罗斯海天然气水合物资源潜力评估	237
8.6	南极陆缘天然气水合物资源形成条件和有利区带分析	239

第1章 南极洲区域地质概况及大地构造演化

1.1 区域地质概况

南极洲大致以南极点为中心，整个大陆都处于 60°S 以南，面积大约 $1400 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占地球总面积的 1/10，南极洲陆地的 98% 常年被冰雪覆盖，冰盖的平均厚度约为 2 ~ 2.5 km，最厚可达 4.8 km。

从大的构造格局来看，南极洲大陆可以分为东南极、西南极及位于其间的横贯南极造山带三大构造单元（如图 1-1）。其中，东南极以老的变质岩为特征，主要为新元古代至早古生代的变质基底岩系，通常被称为东南极地盾，也同时发育早泥盆世至侏罗纪的沉积盖层；西南极为环太平洋活动带的褶皱系，发育早中生代埃尔斯沃斯造山带、晚中生代至早新生代的安第斯造山带以及晚新生代火山岩系；横贯南极造山带是一条早古生代活动的造山带，可能与冈瓦纳大陆聚合形成过程有关。

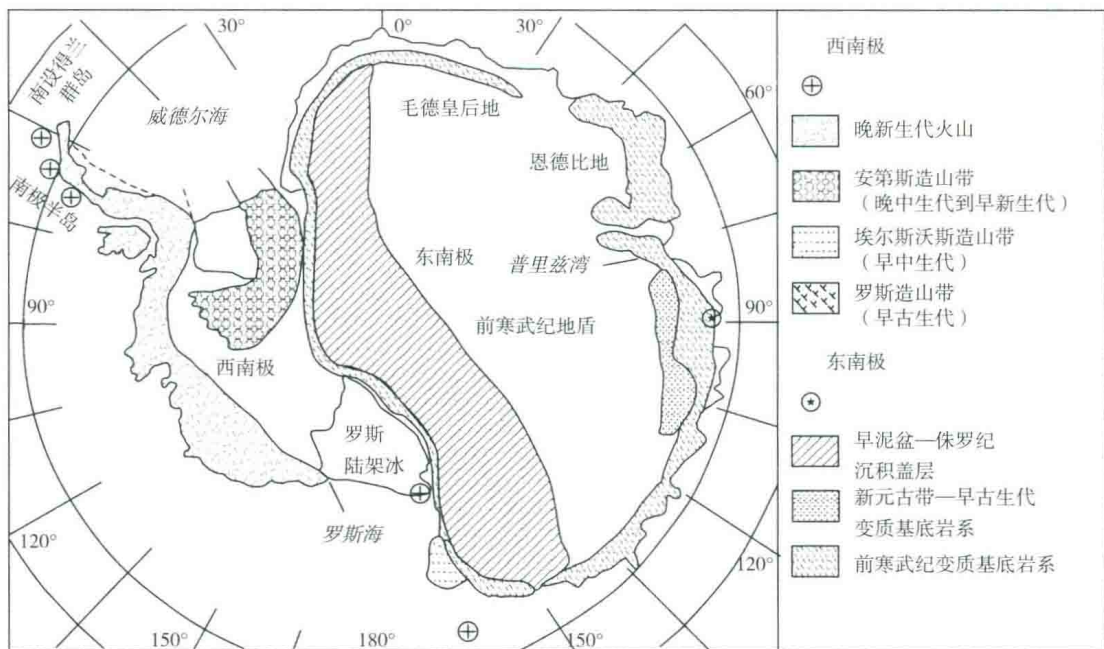


图1-1 南极洲大陆大地构造单元划分简图

据位梦华，1986；陈廷愚等，2008改编

东南极地盾是南极大陆最大的构造单元，是典型的地盾，其基底岩层由前寒武纪至早古生代中、高级角闪岩相及麻粒岩相片麻岩等构成，上覆晚古生代至早中生代近水平的沉积盖

层。东南极的太古代地层主要发育于恩德比地 (Enderby Land), 以纳皮尔 (Napier) 杂岩为代表 (陈廷愚等, 1995)。在普里兹湾地区赖于尔群岛 (Rauer Islands) 和西福尔丘陵 (Vestfold Hills) 地区出露太古代正片麻岩。在南查尔斯王子山 (Prince Charles Mountains) 还发育大片的太古代绿岩带。东南极的元古界地层分布很广。此外, 东南极地区还发育有基性—酸性侵入岩, 特别是紫苏花岗岩。

西南极褶皱系主要为中、新生代造山带, 包括南极半岛、玛丽伯德地和威德尔海西海岸等, 地质历史复杂。其中, 南极半岛一带发育有典型的沟—弧—盆体系, 表现出与太平洋俯冲密切相关的特点。整个西南极地区沉积岩和火山岩系列分布广泛, 大部分岩层都经历了强烈的褶皱和变质作用, 部分地区出露中—晚元古代及早古生代变质岩系和沉积岩系。

罗斯造山带是横贯南极的山脉, 为早古生代发育的造山带, 其大地构造特征具有过渡性质, 基底与东南极地盾相似, 盖层的发育则与西南极有关。基底岩系为下伏的元古宙或新元古代至早古生代变质基底岩系, 上覆发育产状极为平缓的泥盆纪至三叠纪沉积岩, 基底岩系与沉积盖层之间呈构造不整合接触。沉积盖层下部以泥盆系泰勒群 (Talor Group) 为代表, 为一套浅海—滨海相至陆相的砂岩、粉砂岩及石英砂岩; 中部为石炭纪末至二叠纪初的冰碛岩; 上部以维多利亚群为代表, 主体为含舌羊齿的煤系地层。另外, 罗斯造山带还发育有晚元古代、早古生代中酸性侵入岩以及早、中侏罗世基性玄武岩, 可能与冈瓦纳古陆的解体有关。在上新世至更新世发育一层冰期层, 并有大量碱性玄武岩喷发, 如罗斯岛上的埃尔伯斯 (Erbus) 火山 (陈廷愚等, 1995)。

1.2 南极洲大地构造演化

1.2.1 前寒武纪

从基于全球古地磁数据库的板块构造重建结果来看 (图 1-2), 中元古代时, 东南极板块与澳大利亚板块联合在一起, 此时的印度板块则独立于东南极—澳大利亚联合板块之外 (对此存有争论, 如 Li 和 Powell (2001) 的板块重建方案中将印度板块与东南极和澳大利亚板块联合在一起, 但是近些年对于普利兹造山带属于泛非期碰撞造山带这一构造属性的厘定, 将印度板块独立于东南极—澳大利亚板块之外的方案可能更为合理), 普里兹湾地区可能处于被动大陆边缘环境; 新元古代时期, 随着印度板块不断向东南极—澳大利亚板块靠近, 普里兹湾地区可能处于活动大陆边缘环境, 直到印度与东南极、澳大利亚最终在泛非期联合形成冈瓦纳大陆 (见 1.2.2 节内容)。

南极洲的前寒武系主要分布在东南极地区, 现今为止所测到的最古老的岩石为普里兹湾相邻的恩德比地的纳皮尔山脉中的纳皮尔杂岩, 苏联学者用 Pb 同位素法测得的年龄值为 4000 Ma, 显示属于太古宙, 为一套麻粒岩相的深变质岩系, 其后澳大利亚的学者也得到了相似的年龄值, 分别为 2400 ~ 4000 Ma 和 2400 ~ 3100 Ma。在毛德皇后地的花岗岩中也测得了约 3000 Ma 的年龄, 威尔克斯地有 1500 ~ 500 Ma 的年龄资料。角闪岩和绿片岩相岩类见于大陆一侧基岩最内部出露处的兰伯特冰川最前端, 可见薄片状和非薄片状花岗岩侵入角闪岩和绿片岩相岩类中。毛德皇后地西部发育有前寒武纪碎屑岩类, 包括杂砂岩、长石砂岩和砾岩, 属浅水沉积环境。这些碎屑岩与基性和中性熔岩流呈互层关系, 有些熔岩具枕状构造,

可能为海底喷发的产物。这些碎屑岩及基性和中性熔岩受区域变质作用影响不深，仅见绢云母化长石。前寒武纪时期（约 1600 Ma）的巨大辉绿岩体侵入其中，在毛德皇后地西部还有较高级变质岩类，同时该地区还见有可能的前寒武纪时期的深成岩、闪长岩和花岗岩等。



图1-2 全球中元古代（1100 Ma）古板块构造重建

1.2.2 新元古代至早古生代泛非构造运动

泛非构造事件是地质时期全球具有重要意义的一次构造运动，该构造运动是冈瓦纳超大陆聚合与形成的直接结果，对全球众多地区产生了作用的构造影响，造就了多条横贯全球的巨型造山带，包括巴西利亚造山带、科巴伦造山带、东非造山带、罗斯—德拉梅雷造山带以及横贯南极造山带等（图 1-3）。

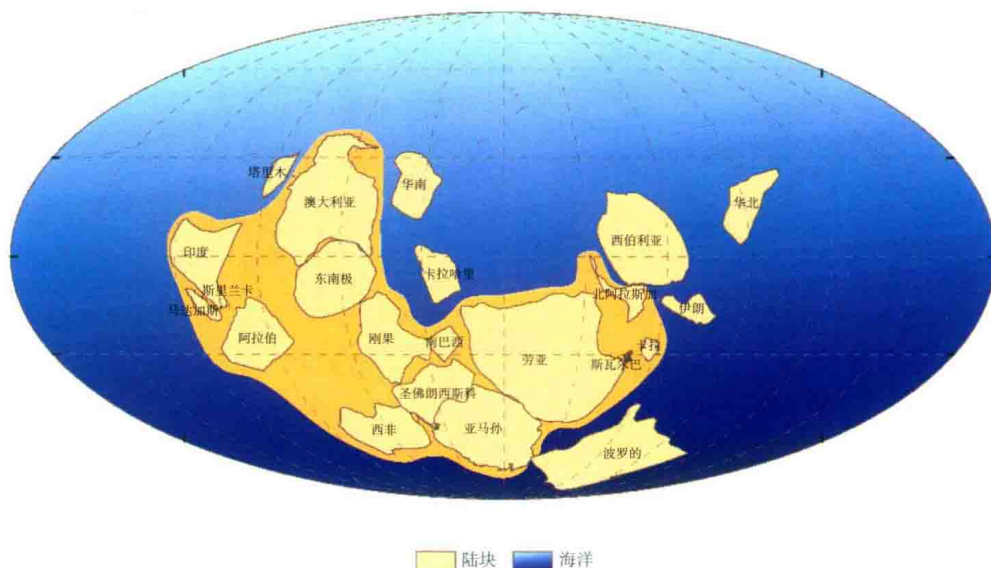


图1-3 全球新元古代（600 Ma）古板块构造重建

寒武纪（510 Ma）时，经过泛非运动之后，南美、非洲、阿拉伯、印度、南极和澳大利

亚已经聚合形成了冈瓦纳大陆。此时，现今南大西洋南部地区被聚合在一起的非洲西部和南美东部所占据，位于冈瓦纳大陆的内部；非洲北部和南美北部位于冈瓦纳大陆的外围地区，处于被动大陆边缘环境；南美西部地区位于冈瓦纳大陆的外围地区，但处于活动大陆边缘环境（图 1-4）。

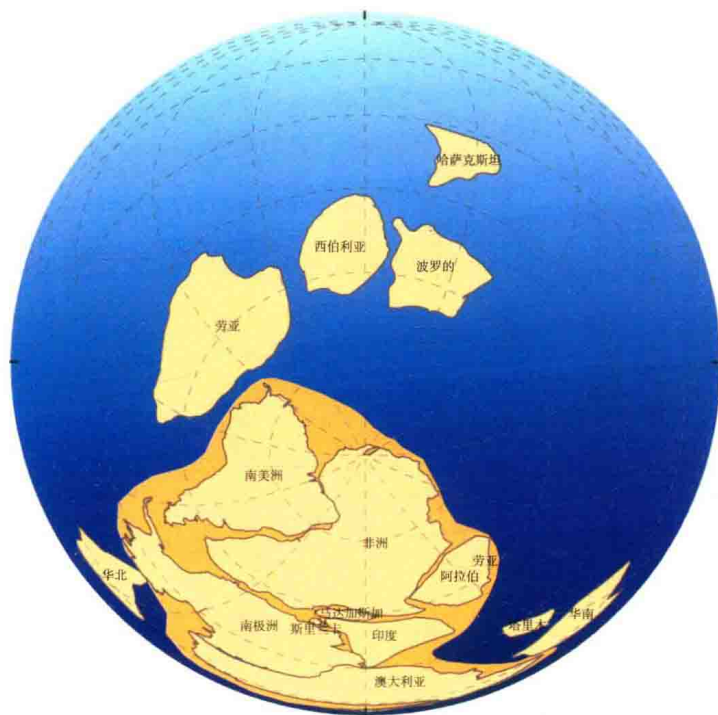


图1-4 寒武纪（510 Ma）古板块构造重建

横贯南极造山带代表着东南极和西南极完成拼合，标志着现今意义上的南极洲板块正式形成。造山带的基底岩系主要为元古界变质岩以及泛非期的变质岩系，与东南极地盾具有相似的基底特征；上覆沉积盖层则具有与西南极相似的特征，这也从侧面印证了东南极和西南极在泛非期完成碰撞拼合。罗斯造山带内的岩体以古生代花岗岩为主，代表性的岩体有 Granite Harbour 岩体和 Admiralty 岩体，主要由花岗岩、闪长花岗岩和英云闪长岩组成。

1.2.3 二叠纪—三叠纪早期裂谷事件

在冈瓦纳超大陆形成之后的很长一段时间内，非洲、马达加斯加、印度、澳大利亚和南极洲板块联合在一起的冈瓦纳大陆构造较为稳定，接受剥蚀（图 1-5）。

直到二叠纪—三叠世时，可能由于造成潘吉亚泛大陆中南方冈瓦纳大陆与北方劳亚大陆裂解分离的超级地幔柱的影响，在普里兹湾地区发育早期裂谷作用，在普里兹湾地区发育二叠系—三叠系的沉积层序。二叠—三叠系沉积物露头仅出露在北查尔斯王子山的 Beaver 湖地区，但是地球物理资料显示其可能还局限地分布于兰伯特地堑和普里兹湾盆地。在比佛湖地区的露头，可见二叠—三叠系层序厚度约 270 m，为含煤陆相地层，称为艾米莉群（Amery Group）（McLoughlan and Drinnan, 1997），被认为属于兰伯特地堑西部地区的一个小型断陷盆地沉积（Shipboard Scientific Party, 2000）。Cooper 等（1991）将二叠—三叠系称为 PS.4 层序，认为是一套陆相河流汇水盆地的粉砂岩和红层砂岩沉积。

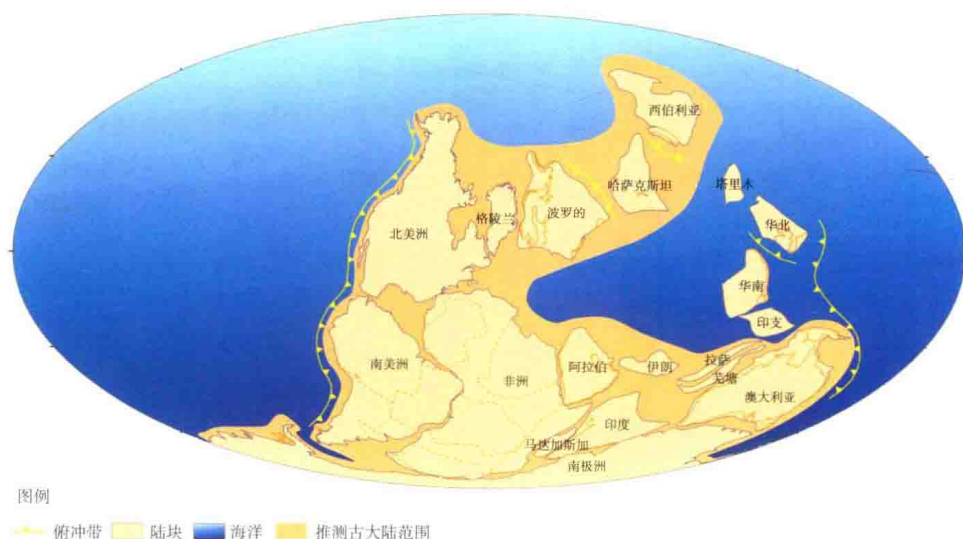


图1-5 全球晚古代早期(320 Ma)古板块构造重建

1.2.4 侏罗纪以来冈瓦纳裂解

侏罗纪开始的又一次大火成岩省和地幔柱事件造成了南方冈瓦纳大陆的裂解分离,非洲、马达加斯加、南美、印度和澳大利亚相继与南极洲分离,形成现今的板块格局。

侏罗纪(165 Ma)时,冈瓦纳与劳亚大陆持续分离,非洲与南美北部重新回到冈瓦纳外围的被动大陆边缘环境;非洲西缘和南美东缘由于裂谷作用尚未开始,处于冈瓦纳大陆的陆内环境;非洲东南部地区处于卡鲁地幔柱持续影响下的伸展环境;南美西缘、南极南缘和澳大利亚东南缘处于泛大洋俯冲背景下的活动大陆边缘环境(图1-6)。



图1-6 全球侏罗纪(165 Ma)古板块构造重建

中侏罗世时,南方冈瓦纳大陆所属板块中出现了3个大火成岩省。①南非的卡鲁(Karoo)大火成岩省。该大火成岩省体积约为 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 并且一直延伸到东南极洲的毛德皇后地(Cox, 1988)。U-Pb 锆石法测得的年龄为 $(183 \pm 0.6) \text{ Ma}$ (Encarnacion et al., 1996)。Duncan等(1997)通过 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年后认为,该大火成岩省的活动时间非常短暂,仅从183 Ma活动至180 Ma,持续仅3 Ma左右。②南极洲的Ferrar大火成岩省。该大火成岩省体积约为 $0.5 \times 10^6 \text{ km}^3$, 位于罗斯造山带(横贯南极山脉, Transantarctic Mountains)一狭长的带内(长

约 2000 km), 一直延续到澳洲的塔斯马尼亚岛、澳大利亚和新西兰 (Minor and Mukasa, 1995; Storey and Kyle, 1997; Duncan et al., 1997; White and McKenzie, 1995; White, 1997)。南极洲的 Ferrar 闪长岩的 U-Pb 锆石法测得的年龄为 (183 ± 1) Ma (Minor and Mukasa, 1995), Dufek 层状辉长岩岩体所获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (182.5 ± 2.4) Ma (Storey and Kyle, 1997)。(3) 南美 Chon Alike Silicic 大火成岩省。该大火成岩省的体积约为 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^3$, 主要由硅质岩组成, 位于南美的巴塔哥尼亚地区, Rb-Sr 等值线年龄为 (188 ± 1.0) Ma、 (183 ± 2.0) Ma、 (181 ± 7.0) Ma、 (181 ± 4.0) Ma、 (178 ± 1.0) Ma、 (169 ± 2.0) Ma 和 (168 ± 2.0) Ma (Storey and Kyle, 1997), 相较于煤铁质岩石有更长的岩浆活动时间, 可能代表着早期的侵入岩的再次熔融活动。Storey 和 Kyle (1997) 将冈瓦纳大陆裂解与这些大火成岩省的活动相联系, 提出冈瓦纳大陆之下发育的地幔柱导致了该大陆的最终裂解。白垩纪 / 新生代交界时的印度德干大火成岩省可能也与印度此时与南极洲—澳大利亚的分离密切相关。

从板块构造恢复结果来看, 非洲与南美以及非洲—印度—南极洲在早白垩世裂解作用已经开始, 表现为南大西洋南部两岸已经开始分离 (图 1-7)。从约 132 Ma 南大西洋最南端的海底扩张开始, 整个南大西洋边缘地区都经历了显著的伸展 / 地壳减薄, Parana-Etendeka 断裂带大约右旋走滑了约 175 km (Torsvik et al., 2009)。这意味着, 即使海底扩张作用向北传播并且在约 3 ~ 4 Ma 内到达了 Parana-Etendeka 断裂带一线, Parana-Etendeka 断裂带以北地区 (如巴西陆缘的桑托斯 / 坎波斯) 经历了显著的伸展作用, 这些伸展作用直到 Barremian 期为止部分被 Parana-Etendeka 断裂带的右旋活动所调节。与此同时, 非洲和南美大陆内部的板内裂谷作用显著发育。



图1-7 全球早白垩世 (125 Ma) 古板块构造重建

晚白垩世 (90 Ma) 时, 冈瓦纳地区的板块构造表现为冈瓦纳大陆的持续裂解, 此时非洲与南美洲已经完全拉开, 南大西洋形成; 印度—马达加斯加板块与非洲和南极—澳大利亚已经完全分离, 印度洋已经形成但范围有限; 南极板块与澳大利亚板块的裂解作用刚刚开始, 尚未完全分离 (图 1-8)。

古近纪 (40 Ma) 时, 非洲与南美板块持续分离, 南大西洋不断扩大; 非洲与南极—澳大利亚持续分离; 南极与澳大利亚板块直接扩张洋脊形成, 大洋持续拉开; 印度板块快速向北移动并与马达加斯加分离, 印度洋持续扩大, 相应地, 新特提斯洋缩小并最终关闭 (图 1-9)。