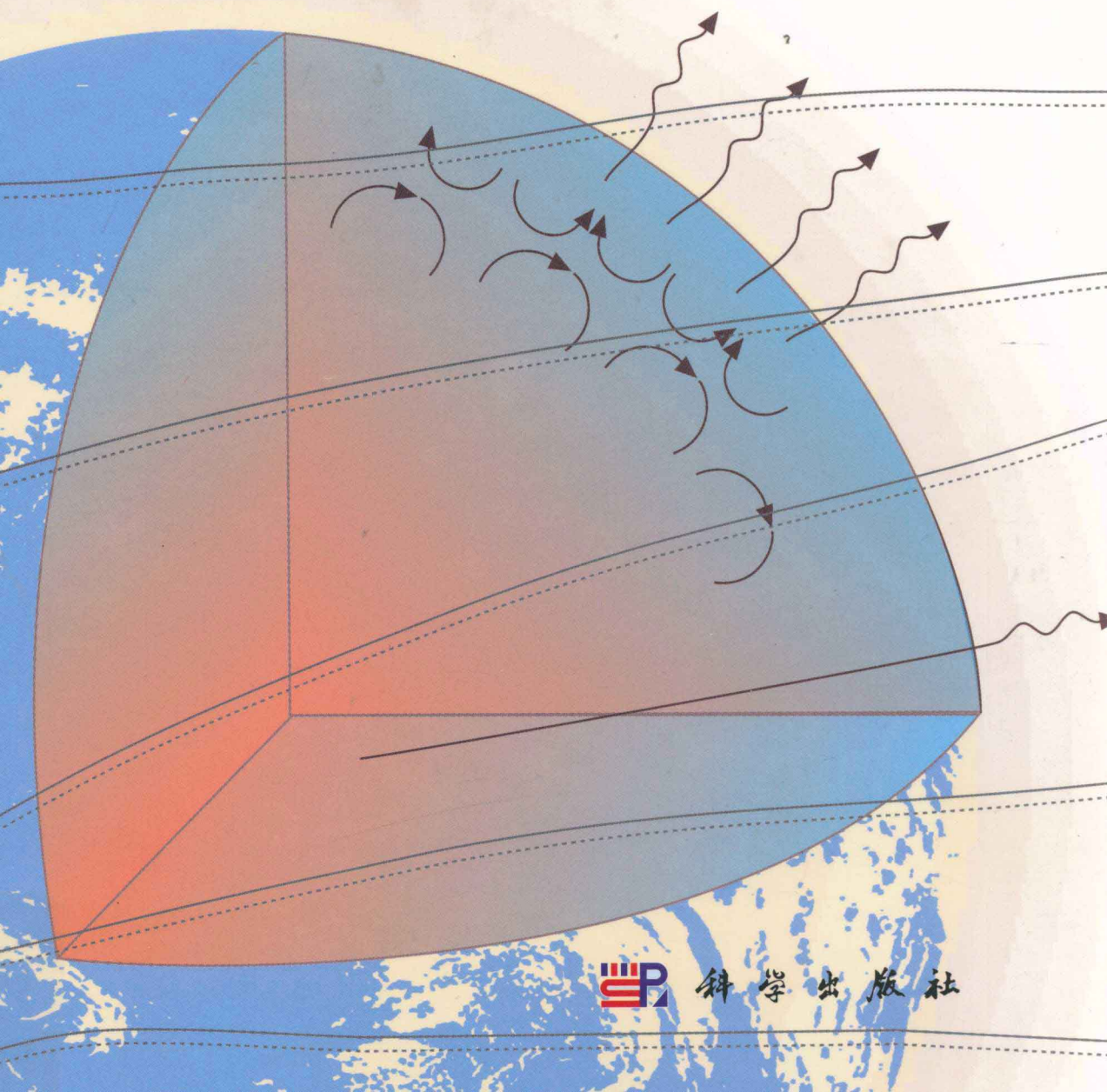




科技部创新方法工作专项：固体地球科学研究方法(2009IM020200)资助

固体地球科学研究方法

丁仲礼/主编



科学出版社



科技部创新方法工作专项：固体地球科学研究方法(2009IM020200)资助

固体地球科学研究方法

丁仲礼 主编

科学出版社

北 京



内 容 简 介

本书对固体地球科学的研究方法进行了全面总结和介绍。全书分为五部分：地球表层系统环境重建、地球深部系统、地质作用的定年、岩浆和变质作用过程、构造过程。各部分分专题就相关科学问题的由来、内涵、意义、发展趋势，尤其是解决此问题的科学方法进行了详细介绍，并列举了研究实例。本书内容丰富，文字浅显，适合地球科学领域相关科研人员，尤其是从事固体地球科学研究的中青年学者以及高等院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

?

固体地球科学研究方法/丁仲礼主编. —北京：科学出版社，2013.6

ISBN 978-7-03-037486-8

I. ①固… II. ①丁… III. ①固体地球物理学—研究方法 IV. ①P31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 101438 号

责任编辑：胡晓春 韩鹏 张井飞 王运 韦沁/责任校对：刘小梅

责任印制：钱玉芬/封面设计：黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2013年6月第一次印刷 印张：64

字数：1 518 000

定价：258.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

序

两年前,我们接受科技部的一个任务,目的是对固体地球科学的研究方法做一个较为全面的梳理与归纳。坦率地说,我当时对如何完成这个任务心里很没有底,便找中国科学院地质与地球物理研究所的几位中青年同事商量。大家充分讨论后,得到一个共识,即固体地球科学作为一门实证科学,首先是要揭示固体地球形成演化过程中在不同时间尺度和空间尺度上所发生的各种现象,然后运用物理学、化学和生物学的基本原理,探索这些现象背后的动力机制,最终上升到有普遍意义的科学理论,并应用于包括资源探索、环境保护、工程开发在内的各种实践活动。这样,从方法学的角度就涉及两个层面的工作:一是研制出各种具体的观察手段,为精确、准确揭示现象提供实验基础;二是从思辨的角度提供方法论,为解释现象提供理论基础。

基于以上认识,我们决定把本研究的工作重心放在第一个层面上,即试图对目前固体地球科学研究中的主要实验手段做一较为全面的总结与介绍。这个介绍分成五大块:一是“地球表层系统环境重建”,二是“地球深部系统”,三是“地质作用的定年”,四是“岩浆和变质作用过程”,五是“构造过程”。在每一块下面,我们又决定分成若干专题,分别由不同的作者负责。本书就是这个工作的总结。

在整个工作中,一共有来自全国科研院所和高等院校的 141 位作者参与,每一块又由一位富有经验的科学家负责统稿和撰写前言,他们分别是中国科学院地质与地球物理研究所的郭正堂、张忠杰、李献华、叶凯和肖文交。这五位研究员花了大量的精力和时间,在内容安排、格式统一等方面起了把关的作用。在这五大块下面,共计有 61 篇文章。为统一写作格式,每篇文章分四个部分展开,首先是简要介绍相关科学问题的由来、内涵、意义;接下来重点介绍解决此问题的科学方法,包括原理、技术、适用性,并对未来的发展趋势做出展望;然后选择个别成功的研究实例,对如何应用此方法做简单介绍;最后列出必要的参考文献,以便感兴趣的读者延伸阅读。我们相信,尽管本书内容较为

庞杂,但由于各篇作者都是相关领域中活跃于一线的科学家,并且大家在写作过程中都尽量使用科普性语言,因此对从事固体地球科学研究的中青年学者来说,不失为一本拓展知识结构的有益读物。

使我感到特别荣幸的是,中国科学院的老院长路甬祥院士最近为《科学与社会》期刊撰写了一篇“魏格纳等给我们的启示——纪念大陆漂移学说发表一百周年”的长文,并慷慨向我们赐稿。路院长在担任中国科学院领导期间,十分重视地球科学的研究工作,他花了大量的时间,阅读相关书籍和文献。在这篇文章中,路院长从战略角度,提出地球科学存在着大量的创新机会,认为地球科学今后应更深入地利用数学、物理学、化学、生物学、信息科学、空间科学、工程科学等的理论和手段,从宏观和微观两个角度更深入全面地了解地球形成和演化历史中的不同过程和机制,他的真知灼见无疑对我们具有深刻的启示意义。我们向路院长表示深深的谢意。

在本工作开展过程中,中国科学院地质与地球物理研究所的郭敬辉、杨石岭两位研究员承担了大量的组织工作与事务性工作,在此,向他们两位深表感谢。

从本工作立项到本书完稿,科技部原副部长、国务院参事室刘燕华参事一直给我们这个群体予以鼓励和支持,特致谢忱。

丁仲礼

目 录

❖ 序	
丁仲礼	
❖ 魏格纳等给我们的启示——纪念大陆漂移学说发表一百周年	1
路甬祥	
❖ 固体地球科学研究中的思维方法浅析——以米兰科维奇理论为例	13
丁仲礼	

第一部分 地球表层系统环境重建

❖ 前言	37
郭正堂	
❖ 地质历史时期大气 CO ₂ 浓度重建方法	39
周 鑫 刘 恋 郭正堂	
❖ 古大气环流重建研究方法	55
姜大膀 郭正堂	
❖ 古大洋环流重建方法	66
翦知湑 金海燕 万 随 党皓文	
❖ 过去海水表层温度的重建方法	82
田 军	
❖ 过去陆地地表温度重建研究方法	104
吴海斌 郭正堂	
❖ 古植被和古生态重建方法	121
吕厚远	
❖ 古降水量重建方法	143
肖举乐 温锐林 刘 禹 蔡演军 段克勤 邓成龙 顾兆炎 刘卫国 刘兴起 旺 罗 翟大有 张恩楼 周 朗	
❖ 山体古高度重建	172
吴福元	

❖ 沉积物物源示踪方法	179
谢 静	
❖ 地表侵蚀速率同位素示踪方法	196
顾兆炎	
❖ 地热田储层温度的研究方法	219
鹿忠和 杨峰田 罗 璐	
❖ 地下水运动的研究方法	243
李国敏 黎 明 董艳辉	
❖ 古地震研究的技术和方法	258
冉勇康 王 虎 张培震	
❖ 地下深部生物圈的生物地球物理研究方法	276
潘永信 林 巍 吴文芳 底青云 朱日祥 刘青松	

?

第二部分 地球深部系统

❖ 前言	287
张忠杰	
❖ 地球内部密度结构的重力探测方法	289
王 勇 柯小平	
❖ 地球内部电性结构探测方法	303
底青云 魏文博	
❖ 地球内部热结构研究方法	320
胡圣标 朱传庆 汪集旸	
❖ 地震波研究的基本方法	333
陈晓非 李小凡 张剑锋 赵爱华 张金海 张海明 周 红 张美根	
❖ 地壳精细结构的地震学研究方法	352
张忠杰 高 锐 白志明 王海燕	
❖ 地壳岩石结构重建的地球物理研究方法	369
张 晰 张忠杰	
❖ 地幔结构的地震学研究方法	381
艾印双 吴庆举 雷建设 姜明明	
❖ 地幔转换带和研究方法	402
金振民 张忠杰 吴 耀 田小波	
❖ 地幔对流研究的数值模拟方法	435
熊 熊 郑 勇 钟世杰 冷 伟	
❖ 地核化学成分研究方法	453
张毅刚	

✧ 地磁场形成和演化研究方法	462
朱日祥 刘青松 蔡书慧 葛坤朋 刘成英	

第三部分 地质作用的定年

✧ 前言	479
李献华	
✧ 同位素地质年代学基本原理和方法	481
吴元保 李献华	
✧ 行星与地球形成年龄的测定方法	494
林杨挺 吴福元	
✧ 岩石圈地幔形成年龄测定	515
张宏福	
✧ 岩浆岩形成年龄测定	526
刘勇胜 李献华	
✧ 变质岩形成年龄的测定	537
吴元保 郭敬辉	
✧ 沉积岩年代的测定	547
贺怀宇 邓成龙 吴怀春 朱日祥	
✧ 年轻沉积物形成年龄的测定	566
余克服	
✧ 金属矿床形成年龄的测定方法	580
范宏瑞 陈福坤	
✧ 油气成藏定年方法	594
邱华宁 云建兵 施和生 吴河勇 冯子辉 徐义刚	
✧ 典型地貌面形成年代的测定	605
孔 屏	
✧ 地下水年龄的测定	616
秦大军	

第四部分 岩浆和变质作用过程

✧ 前言	631
叶 凯	
✧ 岩浆岩的元素和同位素示踪方法	633
杨进辉	

❖ 高温地质过程中的稳定同位素示踪	648
郑永飞	
❖ 岩石高温高压实验技术和方法	682
刘 曦 常琳琳 何 强	
❖ 矿物温度计与压力计的标定方法及其应用	699
吴春明	
❖ 地幔柱的识别和研究	715
徐义刚	
❖ 俯冲带化学分异的研究方法	728
孙卫东 张 红 丁 兴 凌明星	
❖ 变质岩石 P - T - t 路径的研究方法	743
刘景波 郭敬辉	
❖ 变质相平衡模拟方法	752
魏春景	
❖ 地壳俯冲深度的确定方法	764
刘 良 叶 凯 曹玉亭	
❖ 冲击变质及其研究方法	779
陈 鸣	

第五部分 构造过程

❖ 前言	789
肖文交	
❖ 全球构造与地球动力学的岩石学方法——以大洋玄武岩研究为例	791
牛耀龄	
❖ 地球古板块位置的古地磁定位方法	805
黄宝春	
❖ 超大陆及其研究方法	818
赵国春	
❖ 山脉成因的大地构造相分析方法	831
肖文交 张继恩 李继亮 韩春明	
❖ 大陆碰撞时间研究方法	842
丁 林 蔡福龙 王厚起 李振宇 李翌芃	
❖ 沉积盆地分析方法	854
孟庆任	
❖ 构造变形的几何学分析方法	866
林 伟 陈 科 褚 杨 冀文斌 陈泽超 王 军	

❖ 岩石变形显微构造与组构分析方法	887
刘俊来 张若愚 郑媛媛	
❖ 造山带伸展构造研究方法	908
张进江	
❖ 活动断裂研究方法	923
张培震	
❖ 山体隆升和剥离速率的研究方法	937
王 非	
❖ 构造地貌研究方法	952
刘 静 赵 越	
❖ 构造地质学中的数值模拟方法	969
何建坤	
❖ 构造过程的物理模拟	981
周建勋	
❖ 地球深部条件下的高温高压流变学实验研究方法	995
章军锋 金振民	

魏格纳等给我们的启示

——纪念大陆漂移学说发表一百周年

2012 年是德国气象学家、地质学家、地球物理学家阿尔弗雷德·魏格纳 (Alfred Lothar Wegener, 1880~1930) 发表大陆漂移学说一百周年 (图 1) (Wegener, 1912a, 1912b)。大陆漂移学说的提出, 开启了 20 世纪地球科学革命的序幕。



图 1 阿尔弗雷德·魏格纳 (Alfred Lothar Wegener, 1880~1930) 和他的著作《大陆与大洋的起源》德文版封面

20 世纪 60 年代初, 美国海洋地质学家 H. H. 赫斯 (Harry Hammond Hess, 1906~1969) 和海洋地球物理学家 R. S. 迪茨 (Robert S. Dietz, 1914~1995) 在海底地形和古地磁学研究的基础上分别独立提出了海底扩张说 (Hess, 1960, 1962; Dietz, 1961)。一年后, 英国剑桥大学的研究生弗雷德里克·瓦因 (Fredrick Vine, 1939~) 和他的导师海洋地质学和地球物理学家马修斯 (Drummond Hoyle Matthews, 1931~1997) 通过海底磁异常条带的研究, 对海底扩张说作了进一步论证, 为大陆漂移学说提供了有力的支持 (Vine and Matthews, 1963)。1965 年, 加拿大地球物理学家威尔逊 (John Tuzo Wilson, 1908~

路甬祥
中国科学院, 北京 100864

路甬祥, 2013. 魏格纳等给我们的启示——纪念大陆漂移学说发表一百周年, 见: 丁仲礼 (主编). 固体地球科学研究方法, 北京: 科学出版社, 1~12

1993)建立了转换断层概念,并最早使用“板块”一词(Wilson,1965)。1967~1968年,美国地球物理学家摩根(William Jason Morgan,1935~)、英国地球物理学家丹·麦肯齐(Dan McKenzie,1942~)和 R. L. 帕克(R. L. Parker)以及法国人勒·皮雄(Xavier Le Pichon,1937~)等连续发表了数篇论文,将转换断层概念外延到球面上,论述了岩石圈板块运动,确立了板块构造学综合模型(McKenzie and Parker,1967;Morgan,1968;Le Pichon,1968)。1973年,威尔逊又提出了大洋盆地从生成到消亡的演化循环(Wilson,1973),即后来著名的威尔逊旋回(Wilson cycle)(图2)(Dewey and Burke,1974)。人们把大陆漂移说、海底扩张说和板块构造说称为全球大地构造理论发展的三部曲。1968~1983年,格洛玛·挑战者号(Glomar Challenger)等深海钻探成果进一步验证了板块构造理论。

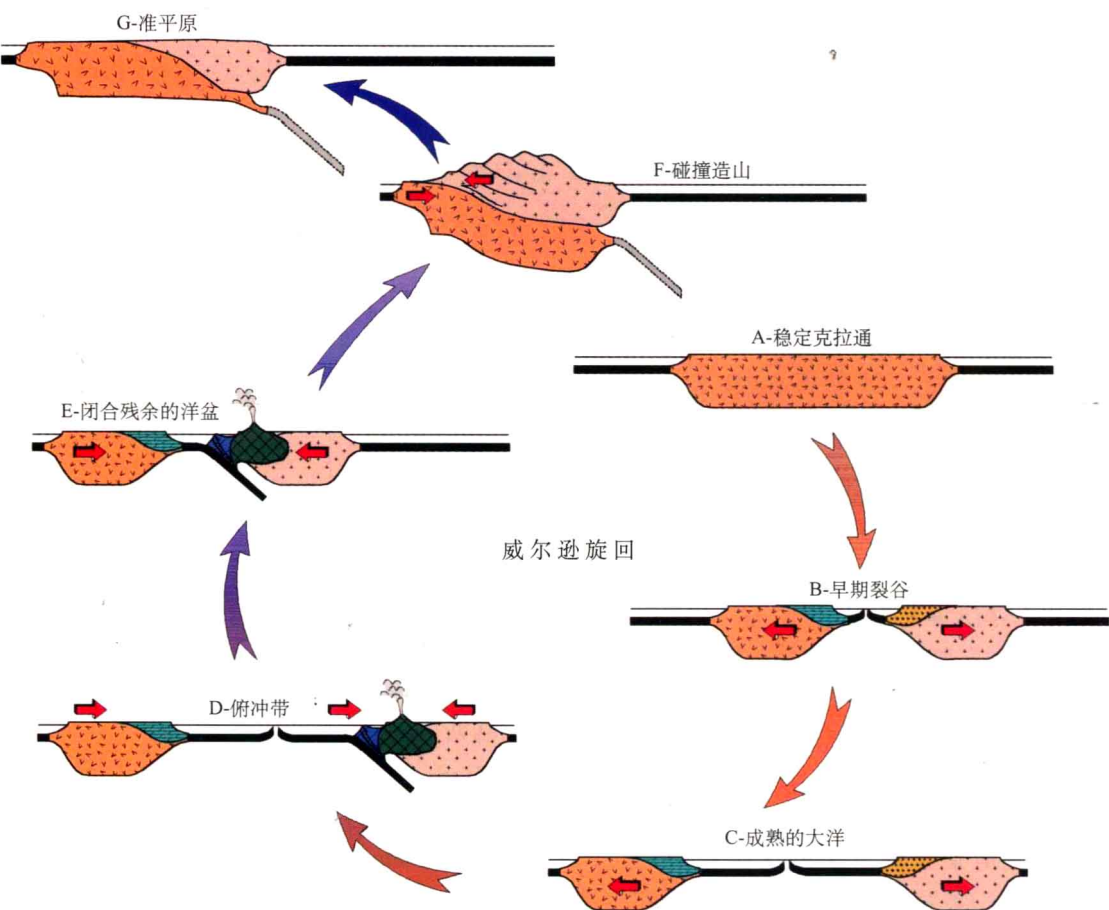


图2 威尔逊旋回示意图(<http://csmres.jmu.edu/geollab/fichter/Wilson/wilsoncircl.html>)

由魏格纳创立的大陆漂移说和20世纪六七十年代创立的板块构造理论是近代地球科学理论取得的革命性进展,改变了整个地球科学的面貌,给构造地质学、地球动力学、地磁学、矿床学、地震学、海洋地质学等几乎所有地球科学的各个领域都带来了深刻变革,也

对地球演化、生命演化研究和科学哲学产生了巨大的影响。这一地球科学理论被认为是与达尔文的生物进化论、爱因斯坦的相对论以及宇宙大爆炸理论和量子论并列的百年以来最伟大的科学进展之一。

回顾魏格纳等的成就,从中可以获得的不仅是新的地球科学知识,更可得到科学精神和科学方法、地球科学研究特点以及所需要的创新条件与环境等多方面的启示。

一、大陆漂移学说的诞生

1492年至1502年,意大利航海家哥伦布(Cristoforo Colombo,1451~1506)四次横渡大西洋,发现了美洲新大陆。欧洲探险家、科学家纷纷参与环球航行与探险考察,促进了地理大发现,使全球地图绘制得更加精确,还拓展了人们对全球地貌、地质、生物多样性及物种分布的认知,引起了人们对地球演化的思考。1596年,法兰德斯(现比利时北部)地图学家奥特利乌斯(Abraham Ortelius,1527~1598)最早提出大陆漂移假说,1858年法国地理学家史奈德(Antonio Snider-Pellegrini,1802~1885)也曾在地里百科全书中提及“美洲”或是“因地震与潮汐而从欧洲及非洲分裂出去的”观点,但这些还都只是一些朦胧的猜想。1620年,英国哲学家、政治家弗朗西斯·培根(Francis Bacon,1561~1626)也曾在新绘制的世界地图上观察到,南美洲东岸和非洲西岸可几近完美地拼合在一起,但并没有引起他更深入的思考。历史将机会留给了德国一位年轻人魏格纳(Alfred Lothar Wegener,1880~1930)。

魏格纳在科隆高中毕业后进入柏林路德维希·威廉姆斯大学(现柏林洪堡大学的前身)攻读物理、天文和气象学,在理论天文学家鲍兴格教授(Julius Bauschinger,1860~1934)的指导下于1905年获天文学博士学位。他喜欢思考和冒险,勇敢而执著,对气象、气候学有着强烈的兴趣并致力于大气热力学和古气候研究,曾利用挂有吊笼的气球升空追踪气团来研究大气现象,他撰写的大气热力学成为当时大学的经典教科书。1906年他还曾与哥哥库尔德搭乘气球在德国上空创下滞空52.5小时的世界纪录。他多次赴格陵兰冰原参与探险考察,研究极地大气环流,还与科赫(J. P. Koch)在格陵兰东北部冰原上首次用螺旋钻钻取了25m冰芯,研究古气候变化(Dansgaard,2004)。但他的兴趣不仅仅局限于此。

1910年的一天,时年30岁的魏格纳因身体欠佳,躺在床上休息。看着墙上的世界地图,意外发现大西洋两岸的大陆轮廓竟可以如此完美的相互拼合,他就想到非洲大陆与南美洲大陆可能曾经是贴合在一起的原始大陆(图3),或由于地球自转的分力或天体引力使之分裂、漂移,才形成如今被大西洋分割的现状。1911年秋,魏格纳偶尔看到一篇有关“陆桥说”的论文,尽管他并不相信大陆之间曾经存在所谓“陆桥”的假说,但却受到文中提及的分处大西洋两岸的南美洲和非洲发现的古生代化石分布相关联现象的鼓舞,于是,他开始搜集资料来验证自己关于大陆漂移的设想。

魏格纳首先分析了大西洋两岸的山系和地层,结果令人振奋。北美洲纽芬兰一带的褶皱山系与欧洲北部的斯堪的纳维亚半岛的褶皱山系遥相呼应,暗示北美洲与欧洲以前曾经“亲密接触”;美国阿巴拉契亚山的褶皱带,其东北端没入大西洋,延伸至对岸又在英

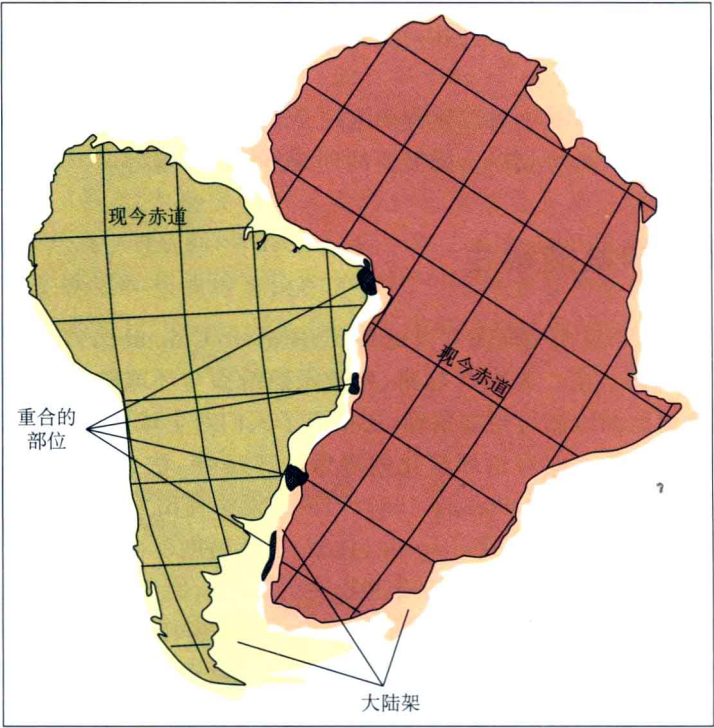


图3 大西洋两岸的大陆拼合示意图

(<http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/grocha/plates/platetec3.htm>)

国西部和中欧一带出现；非洲西部早于 20 亿年的古老岩石分布区与巴西的古老岩石区遥相衔接，二者的构造也彼此吻合；与非洲南端的开普勒山脉的地层相对应的，是南美的阿根廷首都布宜诺斯艾利斯附近的山脉中的岩石等。除了大西洋两岸的证据，魏格纳还发现了非洲和印度、澳大利亚等大陆之间，也有地层构造之间的联系，而且这种联系大都限于 2.5 亿年以前的古生代地层构造。魏格纳又考察了大洋两岸的化石。在他之前，古生物学家就已经发现，在远隔重洋的大陆之间，古生物物种也有着密切的亲缘关系。例如，中龙(*Mesosaurus*)是一种生活在远古时期陆地淡水中的小型爬行动物，它的化石既可以在巴西石炭纪到二叠纪的地层中找到，也出现在南非的同期地层中。在淡水中生活的中龙是如何游过大西洋的？更有趣的是一种庭园蜗牛化石(在石炭纪就已出现)，既存在于德国和英国等地，也分布于大西洋彼岸的北美洲。它们又是如何跨越大西洋的万顷波涛？因为当时鸟类尚未在地球上出现(最早的鸟类出现在侏罗纪)，因此这种蜗牛化石横跨大西洋分布，不可能是由鸟类迁徙造成的。还有一种古蕨类植物化石——舌羊齿，竟然同样分布于澳大利亚、印度、南美、非洲等地的晚古生代地层中。

古代冰川的分布也支持魏格纳的设想。距今约 3 亿年的晚古生代，在南美洲、非洲、澳大利亚、印度和南极洲，都曾发生过广泛的冰川作用，从冰川的擦痕可以判断出古冰川的流动方向。从冰川遗迹分布的规模与特征判断，当时的冰川类型应是产生于极地附近的大陆冰川，而南美、印度和澳大利亚的古冰川遗迹却分布在当今大陆边缘地区，而且其

运动方向为海岸向内陆,按照常识冰川是不可能由低向高运动的,这说明这些大陆上的古冰川不是源于本地,只能设想当时这些大陆曾是连接在一起的,整个古大陆位于南极附近。冰川中心处于非洲南部,古大陆冰川由中心向四周呈放射状流动,才能合理地解释古冰川的分布与流动特征。这一现象曾使地质学家们一筹莫展,却为大陆漂移说提供了有力佐证。其他如蒸发盐、珊瑚礁等古气候标志和热带植物形成的煤炭储藏等,都可用来推断它们形成的年代和纬度,但往往与其今天所在的位置相矛盾,这也说明大陆曾经发生过漂移。

在大量证据和严谨分析研究的基础上,1912年1月6日,魏格纳在法兰克福地质学会首次发表大陆漂移说,4天后他又在马堡召开的自然科学促进会上重申了他的学说。1915年,魏格纳的代表作共94页的《大陆与大洋的起源》(Die Entstehung der Kontinente und Ozeane)德文版正式出版问世(Wegener,1915)。在这本不朽的著作中,魏格纳提出,在中生代以前地球表面存在一个连成一体的古大陆,称为泛大陆(Pangea),由较轻的岩石如花岗岩组成,它像冰山一样漂浮在较重的岩石如玄武岩之上,周围是辽阔的海洋,后来或是在天体引力和地球自转离心力的作用下,泛大陆发生了分裂、漂移和重组,大陆之间被海洋分隔,才形成了今天的海陆格局。

魏格纳的大陆漂移说震撼了当时的科学界,但招致的攻击远大于支持。因为如若该假说成立,整个地球科学的理论就要被改写,因此必须有经得起充分检验的证据。另一方面,魏格纳是一位天文学博士,主要研究气象和古气候,并非地质和地球物理学家。在不是自己的研究领域发表如此标新立异的观点,人们对其科学性难免产生怀疑。最主要的还是:大陆漂移的动力学机制尚未得到合理解释和证实。魏格纳认为可能是由于天体引力和地球自转的作用力,使得漂浮在硅镁质大洋基性岩上的硅铝质大陆发生了漂移。但根据当时物理学家们的计算,依靠这些力根本不可能推动广袤沉重的古大陆。魏格纳的“大陆漂移说”当时只得到南非地质学家杜托伊特(Alexander du Toit,1878~1948)和英国地质学家阿瑟·霍尔姆斯(Arthur Holmes,1890~1965)等极少数科学家的支持,却遭到多数持传统思维和笃信大陆固定说的同行专家们的抵制与否定。

1930年11月,魏格纳在第三次深入格陵兰冰原考察时不幸遇难,长眠于冰天雪地之中,年仅50岁。直到魏格纳去世30年后,基于海洋洋底地貌、地质、地球物理和地球化学新证据提出的海底扩张学说的兴起和板块构造学的创立,大陆漂移学说才终于得到公认。

二、海底扩张学说的形成

20世纪50年代以后,美国地质学家H. H. 赫斯(Harry Hammond Hess,1906~1969)于1960年首先提出海底扩张说(Hess,1960)。随后R. S. 迪茨于1961年也用海底扩张作用讨论了大陆和洋盆的演化(Dietz,1961)。他们被公认为海底扩张说的创立者(许靖华,2006)。

赫斯毕业于耶鲁大学,1932年获哲学博士学位,他曾在普林斯顿大学任教。二次大战期间,他应征加入海军,成了“开普·约翰逊”号的一名年青军官。职务的转换并未改变

他热爱海洋揭示海洋奥秘的理想。他利用在太平洋巡航的机会,用声呐对洋底进行探测,获得了大量洋底地貌数据。在整理分析这些数据时,他发现在大洋底部有连续隆起像火山锥一样但顶部平坦的山体。战后赫斯回到普林斯顿大学执教并继续研究,他发现同样的海底平顶山,离洋中脊近的较为年轻,山顶离海面较近;离洋中脊远的,地质年代较老,山顶离海面也较远,他对这种现象甚为困惑。赫斯综合分析了当时最新的海洋地质研究成果,如大洋中脊体系、海底沉积物带、海底热流异常、地幔对流等,1960年他在普林斯顿大学非正式刊物上首次提出了海底扩张学说(Hess,1960)。明确指出地幔内存在热对流,大洋中脊正是热对流上升使海底裂开之处,熔融岩浆从这里喷出,遇水冷却凝固,将已存老洋壳不断向外推移造成海底扩张。在扩张过程中当其边缘遇到大陆地壳时受到阻碍,于是大洋地壳向大陆地壳下俯冲重新插入地幔,最终被地幔熔融吸收,达到消长平衡,从而使大洋地壳在两三亿年间更新一次。1962年他正式发表论文“海洋盆地历史”(History of Ocean Basins)(Hess,1962)。赫斯在论文的引言中说“我的这一设想可能需要很长时间才能得到完全证实,因此,与其说这是一篇科学论文,倒不如说是一首地球的诗篇”(Hess,1962)。

迪茨是美国海军电子实验室的一名科学家,他曾参加过美国海军的海洋探测和海洋地磁填图工作,他在菲律宾以东的马利亚纳海沟也发现了类似的现象,1961年他在《自然》杂志发表文章,也独立提出了海底扩张的观点(Dietz,1961)。

1963年,F.J. 瓦因和 D. H. 马修斯利用地磁场极性的周期性倒转现象对印度洋卡尔斯伯格中脊和北大西洋中脊的洋底磁异常特征作了分析(Vine and Matthews,1963)。洋中脊区的磁异常呈条带状,正负相间平行于中脊的延伸方向,并以中脊为轴呈两侧对称,如果磁条带记录了洋底扩张的过程,则将有力佐证洋底是从洋中脊向外扩展的假说。随着海洋地质科学的发展,人们钻取岩芯,用放射性同位素测定大陆地壳和大洋地壳的岩石年龄,发现大陆地壳除沉积岩外,主要由花岗岩类物质组成,最老岩石年龄已在30亿年以上,并已经发现有37亿年以前的岩石,平均厚度约35km,最厚处达70km以上。大洋地壳主要由玄武岩组成,都很年轻,一般不超过2亿年,平均厚约5~6km。而且离大洋中脊愈近,年代愈新,并在洋中脊两侧大体呈对称分布。大西洋与太平洋的扩张情况有所不同,大西洋在洋中脊处扩张,两侧与相邻的陆地一起向外漂移,不断展宽;而太平洋底在东部洋中脊处扩张,在西部的海沟处潜没(即后来所说的俯冲),因为潜没的速度比扩张的快,所以逐步缩小。海底扩张说可以解释大陆漂移的动力学机制,使大陆漂移学说重新兴起,主张地壳存在大规模漂移运动的观点取得了胜利,也为板块构造学说的建立奠定了基础。

三、地球板块构造学说的形成

1967至1968年,美国普林斯顿大学的地球物理学家摩根、英国剑桥大学地球物理学家丹·麦肯齐和 R. L. 帕克,以及当时在拉蒙特地质观测所工作的法国地球物理学家勒·皮雄连续发表了几篇论文,他们在大陆漂移学说和海底扩张学说的基础上,又根据大量的海洋地质、地球物理、海底地貌等资料的综合分析,提出了地球板块构造学说(McKenzie and Parker,

1967;Morgan,1968;Le Pichon,1968)。

板块构造学说是现代最盛行的全球构造理论。这个学说认为地球的岩石圈不是整体一块,而是被地壳的生长边界如大洋中脊、地壳的消亡边界海沟、转换断层以及由这些边界转化发展出来的造山带、地缝合线等构造带,分割成许多构造单元,这些构造单元叫做板块。勒·皮雄将全球地壳划分为六大板块,即太平洋板块、亚欧板块、非洲板块、美洲板块、印度洋板块(包括澳大利亚)和南极洲板块(Le Pichon,1968)。

其中,太平洋板块几乎完全是在海洋,其余五大板块都包括大块陆地和大面积海洋。大板块还可划分成若干次一级的小板块,如美洲大板块可分为南、北美洲两个次板块,菲律宾、阿拉伯半岛、土耳其等也可作为独立的小板块等。一般说来,板块内部的地壳比较稳定,板块与板块之间的交界处,是地壳比较活动和不稳定的地带,往往是地震活跃区。地球表面的基本面貌,是由板块相对移动而发生的彼此碰撞、挤压和断裂而形成的。

据地质学家估计,大板块每年可以移动1~6cm,速度虽然很小,但经过亿万年后,地球的海陆面貌就会发生巨大的变化。当两个板块逐渐分离时,在分离处即可出现新的凹地和海洋;地幔物质的对流上升也在大陆深处进行着,在上升流涌出的地方,岩石圈发生裂解,形成裂谷和海洋,东非大裂谷和大西洋就是这样形成的。当大洋板块和大陆板块相互碰撞时,大洋板块因密度大、位置较低,便俯冲到大陆板块之下插入到地幔之中,在俯冲地带由于拖曳作用形成深海沟。大洋地壳被挤压弯曲超过一定限度就会发生断裂,发生地震,最后洋壳俯冲到700km以下,被处于周围高温的地幔物质所吸收。大陆板块受挤上拱,隆起形成海岸山脉,上地幔中的大量熔融物质,又会以岩浆的形式上涌而形成火山岛弧(图2)。太平洋西部的深海沟和岛弧链,就是太平洋板块向亚欧板块俯冲碰撞形成的。太平洋周围分布的岛弧、海沟、大陆边缘山脉和火山、地震也是这样形成的。

根据板块构造学说,大洋的发展可分为胚胎期(如东非大裂谷)、幼年期(如红海和亚丁湾)、成年期(如大西洋)、衰退期(如太平洋)与终了期(如地中海),即威尔逊旋回(图2)。大洋的发展与大陆的分合是相辅相成的。在新元古代约10亿年时,地球上曾存在一个更早的联合在一起的大陆,即罗迪尼亚超大陆(图4)。以后发生分离,到古生代早期,分裂为南北两大古陆,北为劳亚古陆,南为冈瓦纳古陆。到古生代末期的石炭-二叠纪(约2.5亿年前),两个古陆再次连在一起,形成基本相连的泛大陆(Pangea)。以后,这个古陆又发生分离、漂移,陆块之间的距离越来越远,并逐渐发展成现代的印度洋、大西洋等巨大的海洋(图5)。而大陆则是由不同时代的板块不断发生漂移、拼合、挤压、碰撞、断裂、隆起和增生演化。在两个大陆板块相碰撞处,常形成巨大的山脉。到五千多万年前的新生代早期,由于印度板块已向北漂到亚欧大陆的南缘,两者发生碰撞,青藏高原隆起,造成宏大的喜马拉雅山系,古地中海东部完全消失;非洲继续向北推进,古地中海西部逐渐缩小到现在的规模;欧洲南部被挤压成阿尔卑斯山系,南、北美洲在向西漂移过程中,它们的前缘受到太平洋地壳的挤压,隆起为科迪勒拉山系,同时两个美洲在巴拿马地峡处复又相接;澳大利亚大陆脱离南极洲,向东北漂移到现在的位置。于是海陆的基本轮廓逐渐发展成现今的格局。