

评后板块时代的5本经典著作

杨文采

浙江大学地球科学学院,杭州,310027

内容提要: 本文回顾1980年代固体地球科学的5本影响深远的著作,附上简短的评述。

关键词: 地球动力学; 大陆动力学; 书评; 经典著作; 1980年代

20世纪50~70年代地球科学革命产生了板块构造学说。板块构造学说给人们最重要的启示就是,创新地球观的研究路线要攻破物理学与地质学之间的壁垒,以物理学为构架,集合地质学实验信息和地球物理探测信息建立系统的固体地球学说。此后,固体地球学的主要研究对象转变为对岩石圈地质作用和演化的研究,力求综合各种信息回答有关地球行为、属性、组构和相态等各种科学问题,于是就诞生了地球动力学、大陆动力学、大地构造物理学等多个研究领域。1980年代是地球科学这一跃变的高潮时期,也是地球科学研究思想最活跃的时期,产生了一些影响深远的著作。本文回顾1980年代固体地球科学的5本影响深远的著作,对这些著作作了简短的评述。

1 《地球动力学》

原著: Turcotte D L, Schubert G. 1982. *Geodynamics*. New York: John Willy & Sons, 1 - 450.

本书是连续介质物理学对地质问题的应用,全书分9章: 板块构造, 固体应力应变, 弹性和挠曲, 热导, 重力, 流体力学, 岩石流变, 断裂, 孔隙流。

1970年代产生了板块构造学说之后,地学界乐观地认为只要攻破物理学与地质学之间的壁垒,把板块构造学说推广到大陆岩石圈,地球动力学理论就可以建立。地球物质的运动遵循宏观动力学作用规律,这些规律体现在20世纪确立的连续介质力学理论中。大陆岩石圈内部含有大量流体和熔体,固体物质也可以通过挠曲或流变而运动,以连续介质

物理学为构架解释地质信息,固体地球动力学理论可能推动地球科学再次的革命。1982年本书由了解地质学的物理学家选写应运而生,受到广泛关注,后来被列为北京大学地球物理专业研究生教材。

本书是第一部试图在物理学与地质学之间建立桥梁的经典著作,对固体地球中的主要作用力作了分析,列出了相应的方程式。这些方程式依然是今天分析地质作用的出发点。本书的风格可用图1来示例。图1为应用热传导方程计算典型下行俯冲岩石圈的等温线图。计算结果表明,俯冲的玄武岩洋壳下行到深度400km左右,温度达到1600℃。根据岩石物理实验可知,在1600℃玄武岩会发生相变,相变为榴辉岩,密度进一步加大。因此,相变会进一步加大俯冲岩石圈下沉的拖力。此计算例表明,应用连续介质力学理论可以定量地说明一些地球动力学问题。

连续介质物理学是一门定量的和严密的学科,但也是一门简约和实验的科学。当然,这本书作为第一部,还来不及把这些方程式对大陆地质作用的应用条件作深入的分析。与经典物理学一样,依然假定连续介质为均匀介质,因此它们在大陆地质解释中的应用可能存在问题。面对地球这样的组成结构极其复杂的巨系统,物理学定律的导入面临两方面的困难。首先是尺度巨大的地质作用过程很难用物理实验来证实,如幔源岩浆的作用过程就难以在实验室重复。由于作用时期漫长,用计算机做数学模拟时又不知道如何给出准确的初始条件和边界条件。其次,大多数物理定律是通过简约之后得出的,如描述固体形变的虎克定律,只对匀质固体小应变

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41574111)的成果。

收稿日期:2017-02-01;改回日期:2017-02-15;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.021

作者简介: 杨文采,男,1942年生。1964年毕业于北京地质学院物探系,1984年在加拿大McGill大学取得博士学位;现为教授,博士生导师,中国科学院院士。主要从事固体地球物理研究。Email: yangwencai@cashq.ac.cn

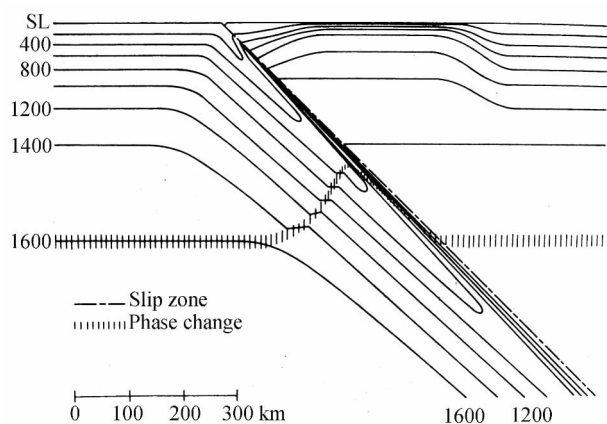


图 1 典型下行俯冲岩石圈的等温线计算结果

(据 Turcotte and Schubert, 1982)

相变带位于深度 400km 左右, 温度 1600℃, 点划线为俯冲岩石圈的滑动面位置

Fig. 1 Isothermal in a typical descending lithosphere

(from Turcotte and Schubert, 1982)

The 400-km phase change is elevated in the lithosphere.

The position of the slip zone is also shown

有效。然而, 地球是极复杂的巨系统, 有许多尺度不同的结构, 它们处于强度不同而又丰富多彩的运行体制中。如果把注意力集中到过度简化自然现象以总结几种模式, 便会有忽略真实自然丰富内涵的危险, 甚至丧失自然过程真正的精华。总之, 对于固体地球, 连续介质物理学定理并非百分之百普适的。

地质学规律是定性的和有区域限制的, 大多数是通过统计取得的, 随着研究深入和统计数字的增加, 地质学的规律会发生变化。面对地球这样的组成结构极其复杂的各态遍历巨系统, 通过统计取得地质学的规律是必不可少的。但是, 通过统计取得的地质学规律必须符合物理学和化学的普适定律。因此, 对地球这样的极复杂巨系统, 大地构造物理学必须兼顾物理学和地质学规律各自的特点, 研究物理学定律和地质统计规律的兼容性。

2 《地球的理论》

原著: Anderson D L, 1988. *Theory of the Earth*. Blackwell Sci. Pub., 1-633 (关华平等译为中文, 由北京地震出版社 1993 年出版)。

全书分 16 章: 类地行星, 地球和月亮, 地壳上地幔, 下地幔和地核, 热力学和状态方程, 弹性和固态地球物理, 非弹性和热导, 地幔化学成分, 岩浆源区, 同位素, 地幔的演化, 地球形状、热流和对流, 地幔的

非均匀性, 粘弹性, 各向异性, 相变和地幔矿物学。

1970 年代产生了板块构造学说之后, 地学界受到鼓舞, 进一步加强了大陆岩石圈研究, 取得大量成果。Anderson 是一位研究地幔物理和化学的科学家, 他全面总结了 1970-80 年代固体地球物质结构和运动的研究成果, 汇集在本书之中, 出版后受到广泛关注。本书是第一部根据板块构造全面总结地球结构成分和行为、属性、相态的书, 是固体地球科学百科全书式的经典著作, 后来被列为中国科技大学 (北京) 地球物理专业研究生教材。

本书是一部定性和定量兼备的书, 风格可用图 2 来示例。图 2 为应用物理方程计算的矿物、岩石和氧化物的地震参数、密度和平均原子量的相互关系。地震参数 φ 定义为体积模量与密度的比值, 平均原子量是物质结构参数。结果表明, 对数密度与平均原子量的比值和地震参数对数 $\ln \varphi$ 成线性关系, 地震参数与密度随矿物、岩石的出现深度增加而加大。例如, 在下行俯冲时玄武岩会发生相变, 相变为榴辉岩, 密度和地震参数 φ 进一步加大。因此可见, 本书是一部同时说明地球行为、属性、相态的优秀著作。今天来看, 本书中给出的数据也许可能要进一步更新, 但是本书中给出的理论依然可以成立。要注意的是, 地质学规律是有区域限制的, 大多数通过统计取得。随着研究深入和统计数字的增加, 本书中给出的理论与区域地质演化特征有可能会有差别。

3 《地球的演化》

原著: Dott Jr, R H, Batten R L, 1988. *Evolution of the Earth*. McGraw-Hill Book Company, 1-643.

全书分 19 章: 时间和地体变化, 洪水、化石和遗迹, 相对时间尺度和现代地层概念, 数字定年, 地球起源和早期演化, 造山和大陆漂移, 洋底和板块构造, 前寒武纪历史, 早期生命, 有机体演化, 早古生代历史, 晚奥陶纪, 中古生代, 晚古生代, 潘吉亚超大陆, 中生代, 新生代, 更新世冰期和人类诞生, 可能最好的世界?

板块构造学说风行之后, 传统地质学家受到鼓舞, 进一步加强了与地球化学和古地磁学的结合, 在全球和区域构造演化方面取得了大量成果。传统地质学收集各种地球演化的遗迹, 在 20 世纪地质遗迹从宏观扩大到微观, 岩石剩余磁性、同位素、微量元素等都是研究可用的地质遗迹。作者全面总结了 1970-80 年代地质遗迹研究的成果, 加以类比和序

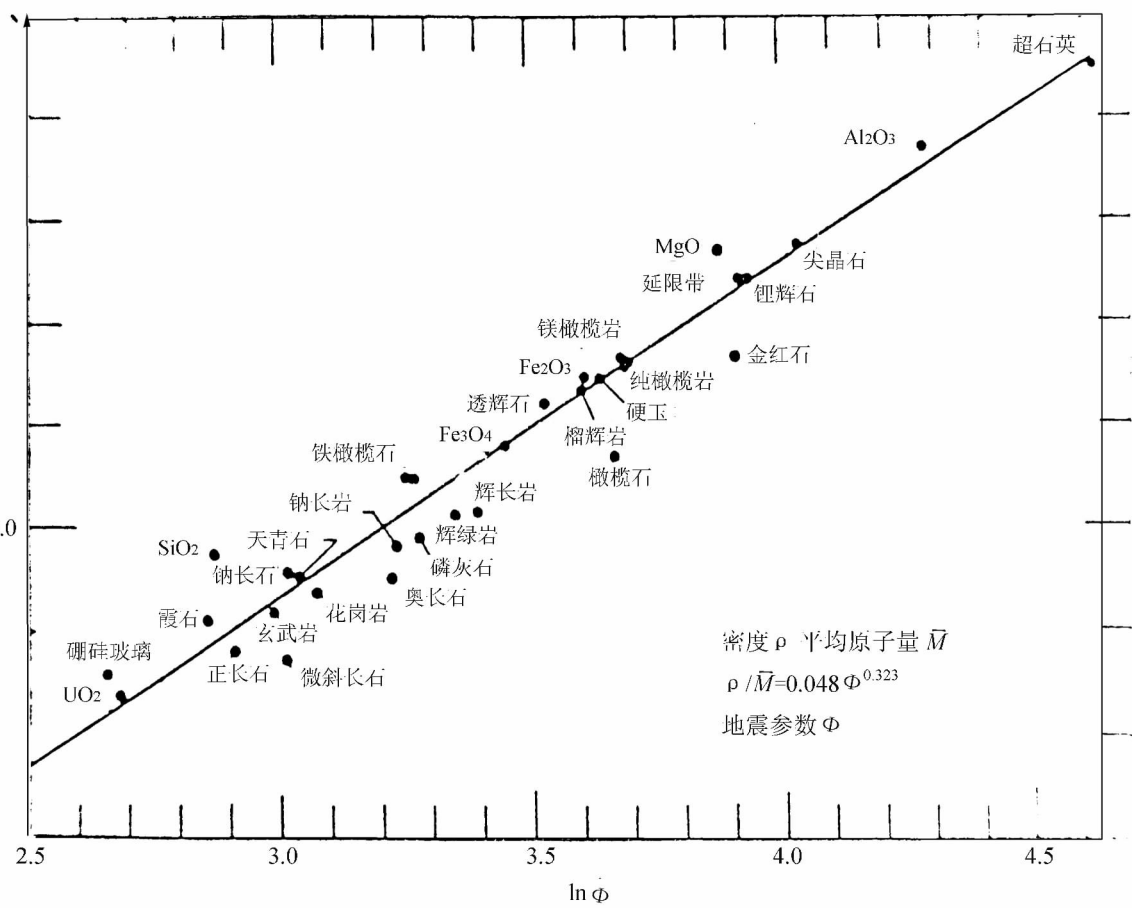


图 2 矿物、岩石和氧化物的地震参数、密度和平均原子量的相互关系(据 Anderson, 1988)
Fig. 2 Relationship between seismic parameter, density and average atomic weight (from Anderson, 1988)

列化,汇集成构造演化方面的模式,尤其是美国大陆构造演化方面的模式,出版后再版多次,受到广泛关注。本书后来被欧美一些大学列为地质专业研究生教材。

本书的风格可用图 3 来示例。图 3 为关于美国西部晚中生代演化的两种假说的图解。顶部剖面图用太平洋低角度俯冲诱发岩浆成矿来解释美国西部晚中生代的演化。中部剖面图用东太平洋洋脊俯冲诱发弧后扩张模式,来解释美国西部晚中生代的演化。底部剖面图表示现今情况,表明盆岭省在继续拉伸。

本书中给出的大陆构造演化方面的模式建立影响很大,现在到处都可见到关于构造演化模式方面的文章,令人不知所措,可见本书影响巨大。本书虽然题为地球的演化,但是,主要讲述美国大陆的演化,对欧亚大陆讲述很少。也要注意图 3 中没有给出深度坐标,没有地球物理探测的资料约束,想象的

成分不可避免。今天来看,下一篇著作在美国大陆构造演化模式方面的成果更为有说服力。

4 《美国大陆的地球物理格架》

原著:Pakiser L C, Mooney W D, (eds). 1989. *Geophysical Framework of the Continental United States*. Geol. Soc. Am. Memoir, 172: 1-798.

全书分两部分:地球物理探测方法和美国大陆岩石圈分区探测的成果地质解释。

大陆岩石圈有 4.0 Ga 的历史,与大洋板块不同,现代大陆板块内部不仅有 200 Ma 以来地质作用的大量痕迹,还保留了 200 Ma 以前岩石圈活动带地质作用的痕迹,如古造山带、古俯冲带、古裂谷及古转换断层等。威尔逊旋回成功地解释了 200 Ma 以来大洋岩石圈发展的旋回,没有回答如何构思大陆岩石圈的演化模式问题。大洋岩石圈是不断循环的,大陆岩石圈却是不断增生而且不断聚合和裂解

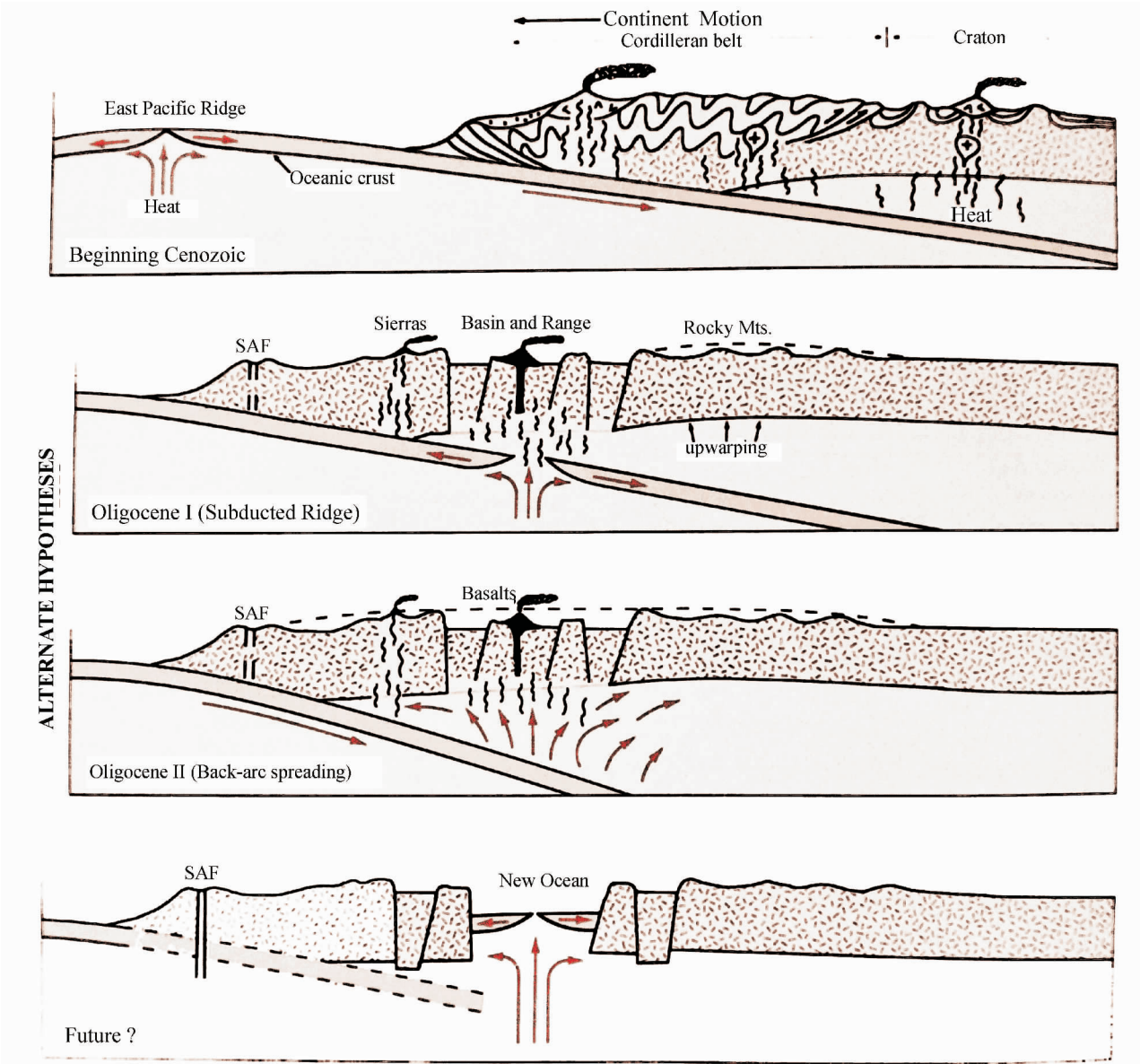


图3 关于美国西部晚中生代演化的两种假说的图解(据 Dott Jr, Batten, 1988)
顶部为低角度俯冲诱发岩浆成矿模式。中部为东太平洋洋脊俯冲及弧后扩张模式。底部表示盆岭省继续拉伸
Fig. 3 Two alternative hypotheses for late Cenozoic fragmentation and upwarping of the western United States
(from Dott Jr, Batten, 1988)

的,大陆岩石圈的演化模式显然比大洋演化模式复杂得多,传统板块构造学说登陆后遇到难题。大陆岩石圈 4.0 Ga 的地质作用有哪些类型?大陆是如何形成的?大陆又是如何增生的?作用过程可用几个阶段描述?作用驱动力是什么?造成了哪些后果?在板块构造学创立之后,这些问题都有待解决。因此,1970 年以后一部分科学家促进了大地构造物理学研究,希望通过地壳上地幔组成结构的地球物理探测,并按照物理学定律恢复大陆岩石圈地质作

用过程,为揭示大陆岩石圈演化过程打下基础。大地构造物理学旨在建立地壳上地幔组成结构的模型,重建区域岩石圈地质作用过程,对比全球岩石圈探测成果推测岩石圈地质作用和壳-幔作用机制。他们认为,地球物理探测发现的大陆岩石圈构造是最重要的地质遗迹之一,由地表观察的地质遗迹不一定反映大陆岩石圈的全貌。
美国科学家最早开展这方面的研究,作者全面总结了 1970 - 80 年代美国大陆地球物理探测的研

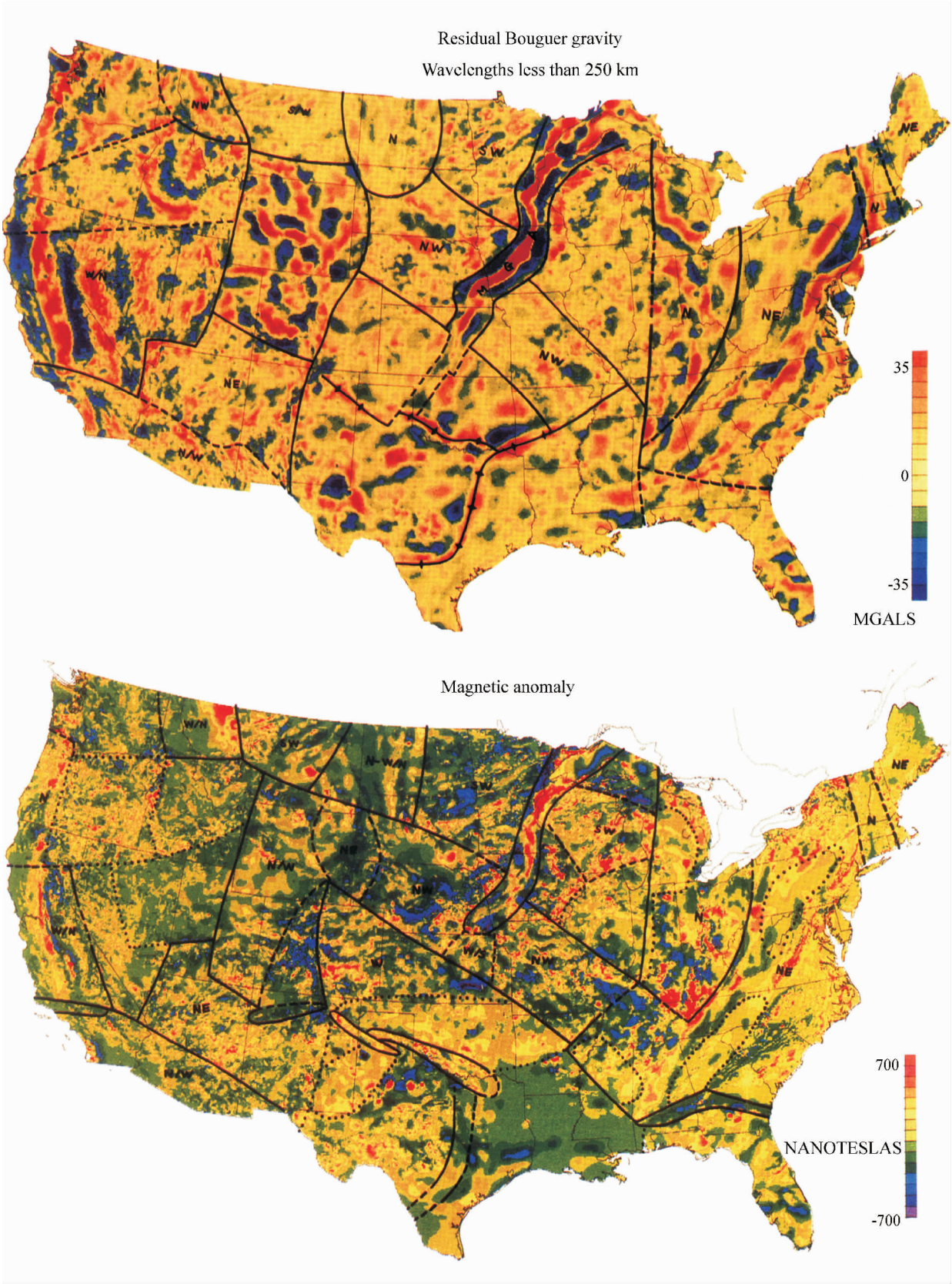


图 4 美国大陆的布格剩余重力异常图(上)和航空磁测异常图(下)(据 Pakiser, Mooney, 1989)
Fig. 4 Bouguer residual gravity anomaly map (top) and magnetic anomaly map (bottom) in United States
(from Pakiser, Mooney, 1989)

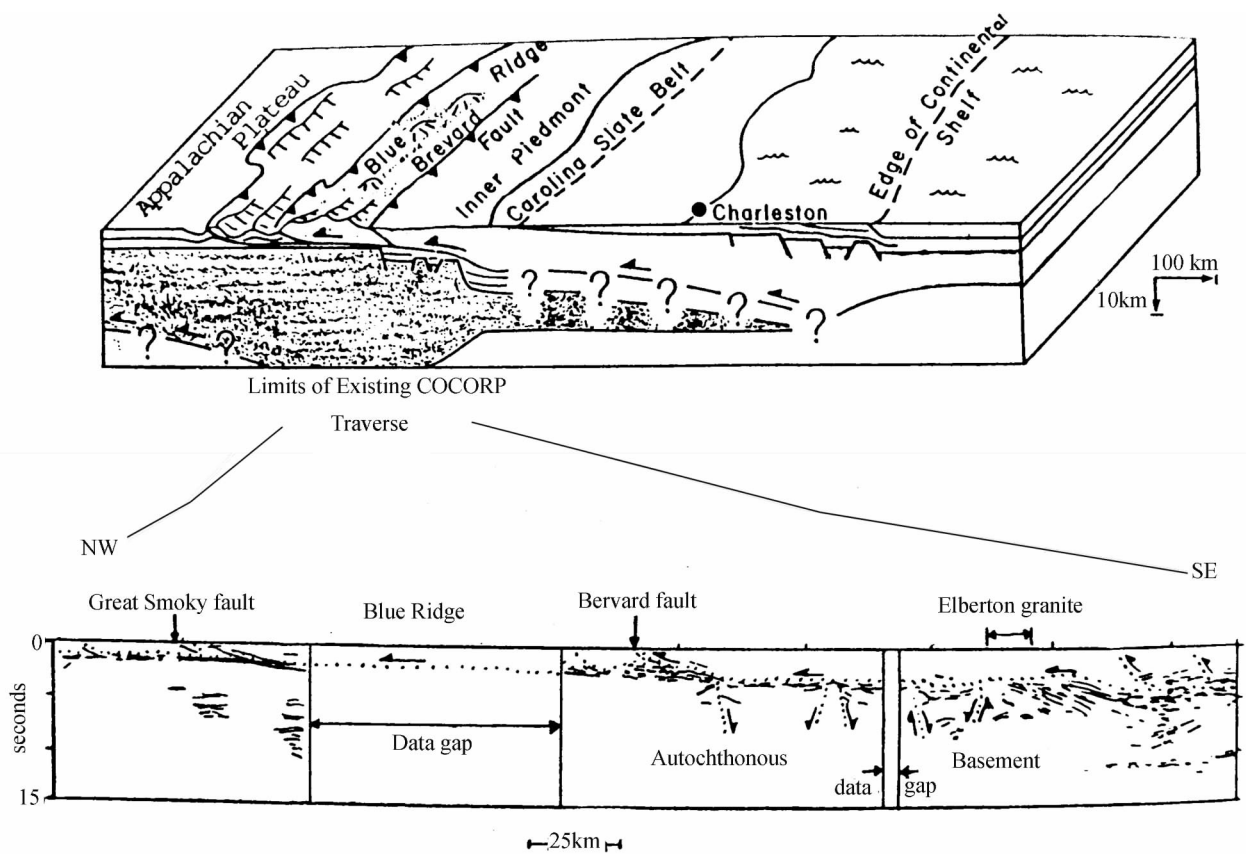


图5 词条“簿皮构造”的插图(据 James, 1989)

下图为南阿巴拉契亚山脉地震剖面,揭示地下的簿皮构造。上图为地震剖面中簿皮构造的地质解释

Fig. 5 Interpretive block diagram and line drawing from southern Appalachian COCORP seismic line(from James, 1989)

究成果,加以类比和序列化,并结合地质演化方面的研究,全面总结了美国大陆岩石圈构造和演化方面的成果,出版后受到广泛关注。本书的风格可用图4来示例。图4为他们汇编的美国大陆的布格剩余重力异常图和航空磁测异常图。重力异常图和磁测异常在美国中北部都出现了很强的条带状异常,它反映了2亿多年前发生的大陆裂谷带。由此可见,地球物理探测发现的大陆岩石圈构造是最重要的地质遗迹之一,结合地表观察可用于岩石圈构造准确定位,定量地勾画大陆岩石圈的全貌。

1990年代以来,用地球物理探测发现大陆岩石圈构造的研究计划大量出现,可见本书影响很大。但是,要注意本书中还没有给出大陆岩石圈三维成像的结果,二维的大陆构造演化模式说服力是有限的。

5 《固体地球物理学百科全书》

原著: James D E (ed). 1989. *Encyclopedia of*

solid Earth geophysics. New York: Van Nostrand Reinhold Com. 1 - 1328.

全书按英文字母顺序排列,包含了板块构造以来美国和欧洲大陆岩石圈探测的主要成果。

1980年以后大地构造物理学研究和地壳上地幔地球物理探测广泛展开,引起许多地质家对地球物理学的兴趣,为搭建地质学和地球物理学之间的桥梁,美国地学界动员了300多科学家来编写这一固体地球物理学百科全书。本书包含了早期地球物理探测发现大陆岩石圈构造的样版,每一个重要词条都是一篇论文。

本书的风格可用图5来示例。图5为他们汇编的词条“簿皮构造”的插图。下图为过南阿巴拉契亚山脉地震剖面,揭示地下1-6km的地震反射构造,上地壳有一层“簿皮”,称为“簿皮构造”。上图为结合地表地质遗迹观察对地震剖面中簿皮构造的地质解释:上地壳发生拆离,造成表面物质向左推移。图中用箭头表示物质推移和形成的断裂。

6 结语

回顾 1980 年代,固体地学的主要研究对象转变为对大陆岩石圈地质作用和演化的研究,力求综合各种信息回答有关地球行为、属性、组构和相态等各种科学问题,为大陆动力学等多个研究领域打下良

好的基础。在地球科学这一跃变的时期产生这五本的著作,影响深远。30 年过去了,它们依然是大陆动力学研究的金矿。30 多年来,观测资料大量增加,为搭建大陆动力学理论体系创造了良好条件。在我们发展大陆动力学理论体系的时候,必须珍惜这 5 本著作的精髓,向这些作者表示尊敬。

A Brief Review on Five Classic Books in Begging
of the Post – plate – tectonics Age

YANG Wencai

College of Geosciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: This paper reviews five books that published in 1980s and having very deep influences in geodynamics and continental dynamics.

Key words: geodynamics; continental dynamics; book review; classic books; 1980s

Acknowledgements: Thanks National Science Foundation of China for supporting this research.

Introduction to Author: Prof. Yang Wencai, Ph. D. on geophysics from McGill University in 1984, an academician of Chinese academy of Science in 2005. Email: yangwencai@cashq.ac.cn

Manuscript received on: 2017-02-01; Accepted on: 2017-02-15; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.021