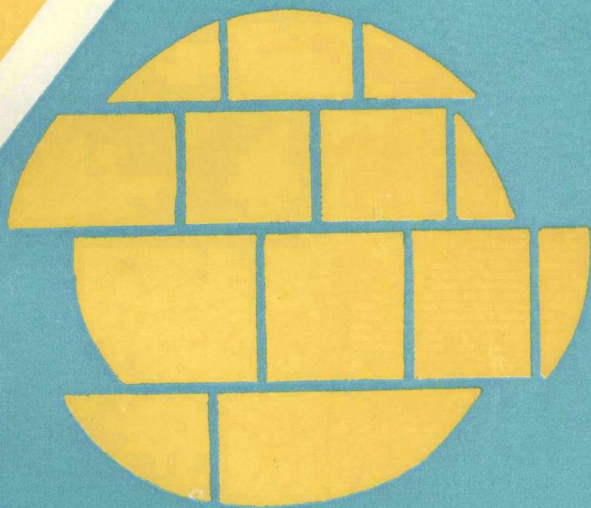


〔美〕A.W. 巴利 等 编
贺明静 徐世芳 李永善 译

板块内部动力学



地震出版社



板块内部动力学

〔美〕 A.W.巴利 等编

贺明静 徐世芳 李永善 译

徐世芳 校

地震出版社

1990

内 容 提 要

本书从不同的角度,全面地介绍了“国际地球动力学计划”(1970—1980年)执行期间在板块内部动力学研究领域所取得的主要进展和有待进一步探讨的问题。全书分为四部分。第一部分:沉积盆地的形成与沉降;第二部分:高原隆起;第三部分:冰川均衡;第四部分:现代地壳运动及其仪器观测。该书集中反映了国际地质学家、地球物理学家和地球化学家之间广泛合作和富有成效的研究成果。

本书可供从事地质、地球物理、地球化学以及与此相关学科研究的科学工作者和高等院校有关专业的师生参考。

Dynamics of Plate Interiors

Edited by A.W.Bally

P.L.Pender

T.R.McGetchin

R.I.Walcott

American Geophysical Union, Washington, D.C.
Geological Society of America, Boulder, Colorado

1980

板块内部动力学

[美] A.W.巴利 等编

贺明静 徐世芳 李永善 译

徐世芳 校

责任编辑:俸苏华

责任校对:孔景宽

地质出版社 出版

北京民族学院南路9号

北京朝阳小红门印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 5.125印张 124千字

1990年6月第一版 1990年6月第一次印刷

印数 0001—1200

ISBN 7-5028-0281-9/P·175

(670) 定价:3.00元

译者的话

自从板块构造学说于1968年问世以后,就以其可靠的依据、明确的观点、定量的分析和准确的预测而为许多地球科学家所逐渐理解和支持。20多年来,不仅推动了地球科学各个领域的发展,而且改变了人们的自然观和地球观。板块边界的拉张、平移、俯冲和碰撞活动,导演了一幕幕壮观的、形形色色的地壳运动,塑造着地球的表面形态和生态环境。但对板块内部的地质作用,初期的板块构造学说则注意不够,论述很少。

历时10年的国际地球动力学计划是继国际地球物理年等地球科学领域国际性合作计划之后又一次历时较长、学科较多、成果丰富而影响更大的研究工作,重点研究地壳运动的机制、动力学原理与模式。可喜的是,这次研究计划重视了板块内部动力学的研究。作为10个专题研究组之一,第7组是专门研究这个问题的。本书就是这个研究组最终成果的汇集。按照内容共分为四个部分,即板块内部的沉降作用、隆起活动、冰川等负载效应对板内构造运动的影响以及现代地壳运动的研究方法。原文共有15篇论文,限于篇幅的关系,我们选择了研究区具有典型性和方法学上具有特色的11篇论文。删去了原文中的第五篇(俄罗斯与西西伯利亚地台的动力学)、第六篇(澳大利亚克拉通及其边缘盆地)和第八篇(巴黎盆地从里阿斯世到晚白垩世的沉降活动),原文中的第四篇(岩石圈板块内部地壳垂直运动的成因)因已有中译文出版¹⁾,亦未选入。

随着板块内部火山活动与地震地质研究的发展,对于板内地壳与岩石圈结构、地质构造以及地壳运动的研究愈来愈受到重视,并且有了较大的发展。但对于板内地质活动研究仍缺少系统的知识介绍。本文集可能起到一些拾遗补缺的作用。

1)全文参见《现代地壳运动》,地震出版社,1988,P.40-53。

本书英文版发行于1980年，译文初稿于1984—1985年完成。由于种种原因直到现在才出版。如果国际地球动力学计划的10个专题报告集都能有中文译本出版，也许对我国地球科学界会更有益一些。限于我们的知识水平和能力，译文中错误和疏漏的地方可能不少，敬请读者批评指正。

1989年3月

目 录

前言	A. L. Hales和C. L. Drake (IV)
序言	R. I. Walcott (VII)
第一部分 沉积盆地的形成与沉降	
盆地与沉降——综述	A. W. Bally (1)
沉积盆地的演化模式	D. Turcotte (24)
被动大陆边缘沉降活动的机制	M. H. P. Bott (33)
西非陶德尼克拉通盆地 (上前寒武纪与古生代)	
的成因与地球动力学演化	G. Bronner等 (48)
密执安盆地	N. H. Sleep等 (61)
第二部分 高原隆起	
高原隆起的形式和机制	T. R. McGetchin等 (68)
第三部分 冰川均衡	
冰川均衡模式与相对海平面	W. R. Peltier (83)
第四部分 现代地壳运动及其仪器观测	
板内运动和应力的仪器观测——	
引言	W. M. Kaula (110)
北美洲的重复水准测量数据与板内垂直运动	
的关系	L. D. Brown等 (113)
板块内部的应力状态	N. C. Gay (132)
现代地壳运动测量方法的改进	P. L. Bender (145)

前 言

地质学家、地球物理学家和地球化学家之间经过10年热诚而富有成效的合作，国际地球动力学计划于1980年7月31日正式完成。其科学成果反映在70多份科学报告与这部最终报告集中。

地球动力学计划的设想是1970年和1971年提出的上地幔计划的必然延续。国际地质科学联合会（IUGS）和国际大地测量和地球物理学联合会（IUGG）得到了国际科学协会理事会（ICSU）对新计划的支持。因而，由国际科学协会理事会成立的国际地球动力学联合委员会来实施国际地球动力学计划。

国际地球动力学联合委员会的管理机构是由七个成员组成的执行局。三人由IUGG指派，三人由IUGS指派，另一人由两单位商定。主席由ICSU指定，秘书长则由执行局成员之一担任。该计划的科研工作由研究组主席和参予国际地球动力学计划的各国委员会代表组成的委员会来协调。执行局和联合委员会每年集会一次，会议往往是与某一协会的集会或联合会代表会议同时进行。

经法国地质和矿物调查局的努力得到了法国政府的支持，委员会的秘书处最初设在巴黎。后来通过加拿大能源、矿业与资源部和加拿大国家研究理事会得到加拿大政府的支持而改设在温哥华。

地球动力学计划的科研工作由10个研究组分别承担。

第1组：西太平洋-印尼区地球动力学；

第2组：东太平洋区、加勒比和斯科舍弧地球动力学；

第3组：阿尔卑斯-喜马拉雅西段地球动力学；

第4组：大陆与大洋裂谷地球动力学；

第5组：地球内部的性质与作用过程；

第6组：阿尔卑斯-喜马拉雅东段地球动力学；

第7组：板内地球动力学；

第8组：大陆与大洋构造之间的关系；

- 第9组：大地构造、变质作用与岩浆活动的历史和相互关系；
- 第10组：全球性综合研究与古构造“复原”。

这些研究组曾发起和主持过各有关专题讨论会。提交这些讨论会的论文发表在科学报告文集中。所有的科研工作，均由各国委员会以国家级进行组织和提供经费，尽管这些委员会同时负责着多项国家计划。国际地球动力学计划的成就应当归功于这些委员会以及它们组织的研究工作的参加者。

IUGG、IUGS和联合国科教文组织（UNESCO）以援助形式为委员会会议和各专题讨论会提供经费。

委员会及其研究组的活动情况发表在17篇出版物上：地球动力学报告1—8，（由F·Delany主编，BRGM出版）；地球动力学重点1—4，（由F·Delany主编，BRGM出版）；国际地球动力学13—17，（由R.D.Russell主编，固体地球物理学全球资料中心A出版）。这些出版物的副本，其中包括科学报告的目录可以从WDC索取到。有的资料目前只有微缩拷贝。

本委员会的工作将在一系列最终报告集中作概要介绍。这些报告是各研究组组织的，首先出版的本卷是第七组，即板内地球动力学组完成的。这个报告集一部分叙述了该计划进行期间所取得的成就；一部分分析了仍待解决的问题。在地球动力学计划结束之际，对两亿年来主要板块运动的运动学显然有了充分的了解，但对引起这些运动的动力学过程却了解甚少。

地球动力学计划最成功之处也许反映在各联合会和各国委员会对参加建立后续计划的热情上，这个计划被称为：岩石圈动力学及地球资源结构与灾害减轻。

对于所有那些为了地球动力学计划而慷慨献出自己时间的学者，谨致谢意！

1971—1975 ICG主席C.L.Drake

1975—1980 ICG主席A.L.Hales

第7组成员名单：（略）

序 言

1970—1979年的国际地球动力学计划的重点是研究地表和地球上层的运动。人们认识到，形变大多发生在岩石圈板块之间的狭窄地带。对于认识地球的过程来说，那些发生在板内，且远离板块边界的，以垂直方向为主的运动也是重要的。因此，由J.T. Wilson领导的第7组作为10个研究组之一，于1971年成立，它的课题为“区域性造陆运动”。1974年，Wilson博士在辞去多伦多大学爱林戴尔学院院长，并决定退休后，地球动力学联合委员会领导小组推选了R.I. Walcott博士担任主席，研究组也改名为“板块内部地球动力学”组。计划的目标是确定地球上较稳定地区的动力学性质和起因。

但是，地球动力学计划所做的远远不止仅对一些问题的鉴别。为了攻克这些课题组织了多学科的大力协作，使熟悉反演方法和模拟技术的那些人与提供模拟所需要的观测资料的人结合起来；使从事仪器研制、使用现代测地技术准确测量相对运动的人与已经掌握地质时期地质运动知识而试图为学科间研究指出一条途径的人结合起来。

多学科协作既要求突出重点，又要围绕着所研究课题的实质。1975年在法国格勒诺布尔召开的地球动力学委员会会议上，研究组认为在下述四个研究领域从事多学科研究是有前景的：第四纪的垂直运动；从地层记录研究垂直运动；高原隆起的历史与机制；板内形变的仪器测量。

研究组完成任务的主要途径是组织本专题的各种研究讨论会。于是，曾召开过下列专题会议：

1. 1974年在苏黎世召开的现代地壳运动专题讨论会上，R. I. Walcott召集了区域应力和造陆模式的专题讨论；

2. 1976年在达勒姆，由M.H.P. Bott组织了第7、8两个研究组共同参加的大陆边缘和克拉通沉积盆地的专题讨论会；

3. 1977年在斯德哥尔摩由N.A.Mörner组织的地球流变学和第四纪均衡运动专题讨论会；

4. 1978年在弗拉格斯塔夫由T.R.McGetchin组织的高原隆起的方式和机制专题讨论会；

5. 1979年在堪培拉由R.R.Walcott召集的板内动力学专题讨论会。在当时举行的国际大地测量与地球物理协会大会期间，它是地球动力学联合委员会学术讨论的一部分。

在每个专题讨论会上，与会的地球物理学家、测量学家、地质学家和地貌学家——有着不同信仰和国籍的地学家们——相互了解了同一领域而背景与技术不同的科学家的各种见解和信息。

第一次专业讨论会的论文以“现代地壳运动”为题被作为构造物理学杂志的专集出版（第29卷，1975年12月）；第二次会议的论文以“大陆边缘和克拉通盆地”为题发表于构造物理学杂志另一期专集中（第36卷）；第三次会议的论文以“地球流变、地壳均衡和海面升降”的书名出版（1980）。关于第四次的一份报告发表在美国地球物理联合会出版的刊物EOS和研究组的这个最终工作报告上；第五次会议的大部分论文已经或即将在一般杂志上发表。

研究组的这份最终报告以“板块内部动力学”为总题把许多论文汇集了起来。它共分四个部分，每一部分反映该研究组1975年以来活动的一个方面。其中有些是研究组成员写的，而大部分由对各专题具有专长的专家写的。其中资料大多已在上述刊物或其他专刊中发表。但是，研究组提供本报告的意图是把这些论文和新的进展奉献给各位读者。

跨学科工作的一个较大困难是对本学科的专门术语和表达方式虽然容易理解且表达准确，但其他学科从中汲取信息却很困难。例如，建立盆地沉降和冰后回跳模式时，所用的数学表达语言经常使参加研究的地质学家和观测海滩上升的地貌学家难以完全理解。又如，用有确定涵义的各种地层名称或地层学单位表达的地层数据对物理学家来说，就难以从中汲取有用的信息（如从

上覆地层的数据中汲取基底相对垂直运动的信息)。因此,要求每篇文章的作者必须考虑到对自己情报感兴趣的,从事不同学科的读者。我们认为作者们已经成功地满足了这个要求。

本专辑各部分篇幅有所不同,它部分地反映了这项工作的参与者对此计划的热心程度,但主要是由于这些方面对总课题的相对重要性不同。

第一部份份量最大,收集了九篇关于用地层学研究垂直运动的文章¹⁾。这都是研究组内早已公认的非常重要的部分,其中确实有关于地壳稳定区,特别是大陆区历史的大量信息。通过地震资料、钻井和地层学分析,至少在原则上可以确定大部分地球表面的相对垂直运动,同时依据简化概念建立的模式可以增进对地球性质的认识。

第二部分是弗拉格斯塔夫专题讨论会的总结,它是由会议的四个参加者写的。会议的组织者T.R. McGetchin博士已经去世了,地学家们失去了一个最有才能、最杰出的同行,他对地球动力学计划有重大贡献。

第三部分里,W.R. Peltier应邀在文中概括了他在解释冰后回跳资料方面所作的工作。

第四部分的四篇论文涉及板内仪器测量中某些重要领域,其中包括水准测量、应力估算和大地测量技术的新进展。这都是发展很快的领域,我们期望在下一个10年中能够看到更多的对了解板块大陆部分作用有用的文献资料。

R. I. Walcott

1) 出于篇幅及其他考虑,中译本已删去了原文的第四、五、六和八篇。——编者注

第一部分 沉积盆地的形成与沉降

盆地与沉降——综述

A. W. Bally

一、引言

在这本关于盆地演化和沉降作用的文集中反映了各种不同的见解，它们代表了这一领域技术发展的真正水平。这些文章可以分为两类：有关盆地沉降的地球物理模式和主要描述盆地性质的文章。除少数外，这些文章大多没有专用一种或几种地球物理模式对沉降、隆起历史进行定量评价。虽然所有作者都尽力按时提交稿件，可是最终还是延误了本文集的出版。所以这篇综述还要提请注意在本文集的作者们交稿和定稿以后出版的有关论文。关于地台盆地成因的评论可参看Sleep等人1980年的另一篇文章。

二、地球物理模式

本文集里，Turcotte对沉积盆地的演化模式作了全面介绍；Bott论述了这些模式对被动边缘的适用性。最后，Artyuskov等人讨论了从下地幔向运动着的岩石圈板块底部圈闭中扩散的分异物的可能效应。在某些情况下，这种扩散作用甚至延伸到地壳以下。已提出的沉降作用的主要机制大约有以下几种。

1. 由沉积负荷引起的沉降作用。按照Bott和其他作者的观点，单纯由这种机制引起的沉降很难超过原始水深的2—3倍，而这种沉降可能与非常厚的浅水沉积层无关；但是正如Bott和Turcotte所述，沉积负荷对深水厚层沉积和大陆隆起环境的沉降活动则有显著的影响。可见，要解释C. Keen(1979)所谓的“构

造性沉降”，必须要涉及其他作用过程或“驱动力”。

2. 由原来受热的岩石圈的冷却和与此有关的密度增加引起的均衡沉降。岩石圈与地壳受到加热作用而隆起，而地表剥蚀又使地壳变薄。后来的冷却作用又使这种变薄的地壳沉降。不过，隆起和地表剥蚀量不足以解释深沉积盆地（即超过5km）的成因，所以还需要用其他的辅助机制（Royden等，1980）。

3. 冷却引起的沉降作用，也可能是岩石圈单纯拉伸的结果（Mckenzie, 1978; Royden, 1980; Sclater和Christie, 1980）。这种拉伸作用可能伴随有上部地壳中的铲状正断层活动以及下部地壳或上地幔的塑性缩颈作用。

4. Royden等人（1980）提出的机制，本文集未作讨论。根据这个机制，沉积盆地与被动大陆边缘可能是由岩石圈破裂以及超基性岩墙与（或）底辟侵入形成的。这种模式与后面第5、6条所描述的机制有联系，只是作用过程较短，而且只局限于可能促使沉积盆地开始形成的地堑系形成阶段。

5. 辉长岩-榴辉岩相变或其他变质作用引起的下部地壳或岩石圈岩石密度增加也能引起均衡沉降。不过，要证明在事实上曾发生过这种大规模的过程是困难的（Sleep等，1980）。Neugebauer和Spohn（1978）曾讨论了下部地壳内亚稳态向较致密的稳定态转变对被动边缘的影响。

6. 上述两种机制可视为部分“大洋化”的特例。不过，地壳完全基性化或“大洋化”被认为是由地幔或更深处提供的超基性物质引起的。在这种过程里，地壳顶部层变为基性，而地壳下部变为超基性，并达到等于或者甚至大于地幔的密度（Beloussov, 1968）。据Artyushkov的观点，这种过程是难以置信的，因为正常地壳与地幔组分的混合体总是比地幔物质轻，所以不可能陷入地幔物质。

7. Bott在本文集中介绍了他对被动边缘沉降与地壳变薄是由塑性中、下层地壳向大洋蠕动所引起的见解。这种蠕动是由被动大陆边缘不均匀的地形负荷引起的。

Vetter与Meissner (1979) 修正了Bott的概念, 并把岩石圈分为脆性的上部层和内部发生高温蠕动的下部层。在被动边缘上, 高密度的大洋岩石圈向附近的大陆下面蠕动, 最终可能引起俯冲, 并使被动边缘向活动的边缘转化。与Bott的观点相反, 作者们认为地壳中部粘度太高, 不可能发生蠕动。

8. Sloss和Speed (1974) 及Sloss (1980) 把熔融体由大陆软流圈向大洋软流圈流动的速率变化形象化。在他们的模式中, 熔融体在大陆之下被截获就引起隆起, 而熔融体向大洋软流圈环流排泄又使大陆收缩和沉降, 这和海底扩张加速是一致的。

9. 在本文集中, Artyushkov把隆起和沉降事件与分异物质周期地上涌联系在一起, 这种分异物在核-幔边界上形成并在岩石圈下扩散。

对于盆地沉降模式有关的岩石圈流变性的介绍, 可参看Beaumont (1978), Beaumont和Sweeney (1978) 以及 Beaumont (1978) 的文章。特别在最后一篇文章里, 作者认为要在各种流变性(弹性、弹性-全塑性、粘弹性与幂次律蠕动)之间或这些性质的各种组合之间加以区别是困难的。因此, 为了比较全面地了解岩石圈的流变性, 需要更多有关激发机制及过去和现在岩石圈性质侧向变化的资料。

三、盆地分类

要解释各种类型的盆地, 可能需要对上述机制作各种组合, 甚至可能需要目前尚未提出的其他机制。另一方面, 从地质学角度来看, 如果要对世界上大量各具特色的盆地作一个概述, 最理想的是对盆地进行分类。本文作者自然选择了自己的分类方法(Bally, 1976; Bally与Snelson, 1980), 不过, 这种分类有一定的随意性, 也容易被改进过的分类系统所代替。

表1代替了过去的地槽分类法, 因为后者不适于反映板块构造学说的进展。图1提供了作为分类基础的巨型大地构造轮廓。图2、3、4分别表示了三种主要盆地类型, 即刚性岩石圈上的盆地、

近缝合带盆地和缝合带盆地的分布。图 5 表示在北美一个大陆上有不同类型的盆地彼此相邻。从地质学观点看，不同类型的盆地可能出于不同的成因。

表1 盆地分类 (根据Bally和Snelson, 1980)

1. 刚性岩石圈上与巨型缝合线的形成无关的盆地
 11. 与洋壳建造有关的盆地
 111. 裂谷
 112. 与大洋转换断层有关的盆地
 113. 大洋深海平原
 114. 跨越大陆与大洋地壳的大西洋型被动边缘 (大陆架、大陆坡、大陆隆)
 1141. 早期上覆裂谷系
 1142. 早期上覆转换系统
 1143. 早期上覆弧后盆地，即潘诺尼亚型和西地中海型盆地
 12. 位于前中生代大陆岩石圈上的盆地
 121. 克拉通盆地
 1211. 位于早期裂谷化地堑之上
 1212. 位于以前的潘诺尼亚型弧后盆地之上
2. 与挤压性巨型缝合带形成有关的刚性岩石圈上近缝合带的盆地
 21. B型俯冲带边缘附近洋壳上的深海槽或海沟
 22. A型俯冲带边缘附近陆壳上的前渊和下伏地台沉积，或海槽
 221. 含隐伏地堑的对冲断层，但很少或没有块断活动
 222. 块断活动占优势
 23. 与挤压性或巨型缝合带引起的末端块断活动有关，而与A型俯冲带边缘无关的中国型盆地
3. 大部分处于挤压性巨型缝合带内的盆地
 31. 与B型俯冲带有关的
 311. 弧前盆地
 312. 环太平洋弧后盆地
 3121. 以洋壳为盆地，并与B型俯冲带 (狭义的陆缘海) 有关的弧后盆地
 3122. 以陆壳或过渡性地壳为盆地，并与B型俯冲带有关的弧后盆地
 32. 与大陆碰撞有关的并位于A型俯冲带弧凹侧的弧后盆地
 321. 陆壳上的或潘诺尼亚型盆地
 322. 过渡性地壳和洋壳上的，或西地中海型盆地
 33. 与缝合带内巨型剪切系有关的盆地
 331. 大盆地型盆地
 332. 加利福尼亚型盆地

下面以这种分类为准，对已提出的各种沉降作用的机制是否

适用于某些比较重要的盆地类型加以评论。

四、各种地球物理模式对不同类型盆地的适用性

下面的评论是以盆地与沉降一节中所包括的论文为基础的。为了保持连续性，我们避免引证本文集和其他一些出版物中作者们的特殊意见和思想；但却引用了在我们的作者提交自己论文时尚未问世的一些新近发表的文章。



图1 全球构造图

巨型缝合带是以非刚性造山变形和包括在这种带内的沉积盆地为主要特征的地带。A型俯冲带（据Amferer）包括大陆岩石圈的有限俯冲；符号对应于面向大陆地壳并部分上冲在大陆陆壳上的褶皱带边界。B型俯冲带（据Benioff）是其褶皱带面向大洋地壳的大洋岩石圈俯冲带。长英岩侵入边界把中国中、新生代岩浆活动区与尚未受此影响的地区分开（据Bally和Snelson, 1980）



图2 刚性岩石圈上的盆地

表1作了更细的分类 (据Bally和Snelson, 1980)

大西洋型(被动)大陆边缘典型地显示了与早期裂谷事件相吻合的下部断裂剖面与漂移相对应的上部沉积层系。两段地层常由一个或几个区域不整合分开。上部层系中最古老的沉积物年龄一般和相邻的最古老的洋壳年龄大致相同。

把以下几种因素综合起来可以较好地解释大西洋型边缘:

(1) 由于深部软流圈物质上涌或者大陆岩石圈单纯拉伸引起的热活动, 被拉伸岩石圈中的铲状正断层可能沿上部脆性层底部伸入下地壳或上地幔。(2) 基性物质的侵入作用。(3) 与大洋扩张演化有关并受沉积负荷影响的冷却作用。(4) 中、下地壳蠕动和下伏软流圈内大洋向大陆方向的蠕动。

热起源的基本成因是不易确定的。岩石圈冷却效应和沉积负荷引起的沉降幅度可以计算出来, 但从下地壳或软流圈蠕动的效应中把沉积负荷效应区分出来还是困难的。

根据钻井和地震反射调查的资料, Steckler与Watts (1978, 1979) 和Keen (1979) 最近研究了北大西洋边缘的沉降活动。