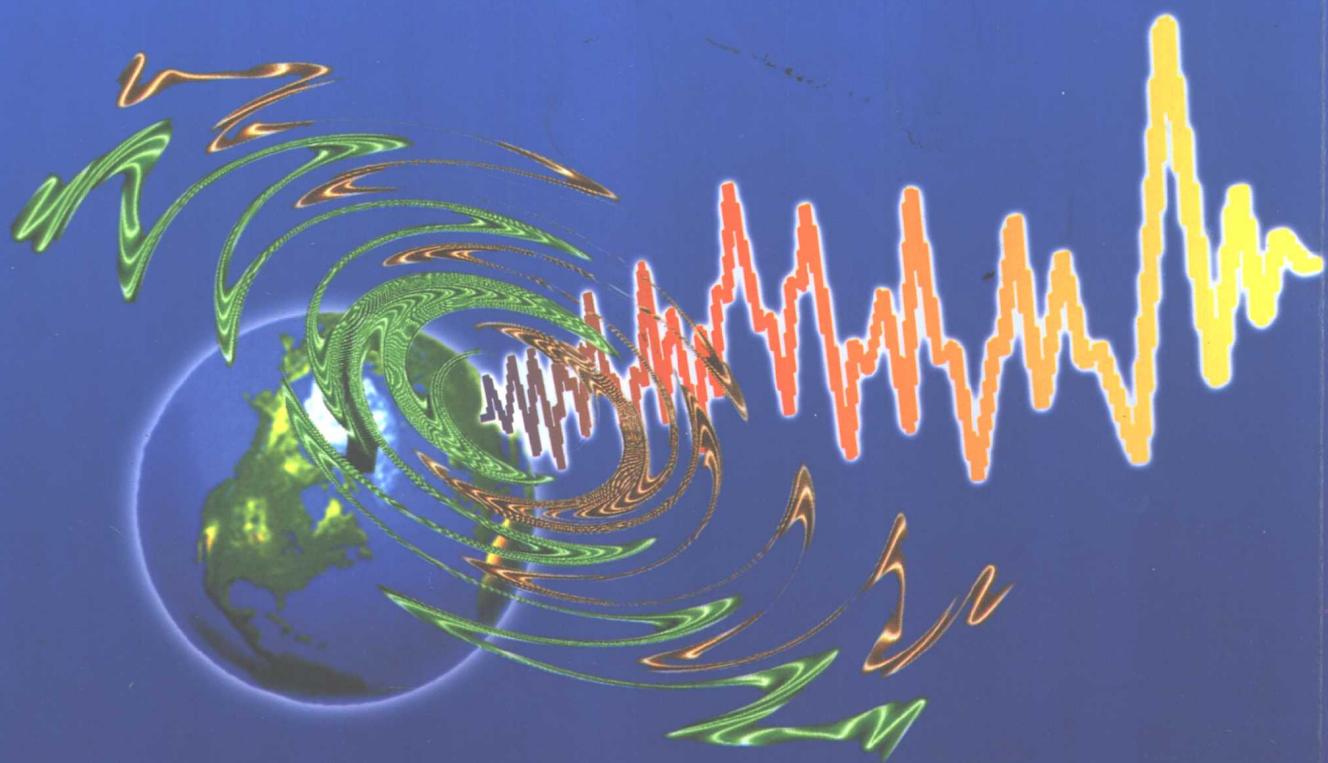


引力·核能 与地球脉动

蒋志 著



地震出版社

引力·核能与地球脉动

蒋 志 著

地 震 出 版 社

2001

内 容 摘 要

本书从爱因斯坦引力方程的近似——达朗伯方程出发,给出了地球引力位与时间、经纬度和地心距有关的解,同时考虑了地球内放射性同位素衰变能和地球外日、月等天体的影响,对地球脉动、地球圈层界限的整数平方关系、地球圈层的差异旋能、地球自转变慢、地磁场倒转机制、地球从长椭球到扁椭球的过程、地球的扁梨形偏离和回归线效应、古温度脉动、地壳和岩石圈的各种构造形态、火山、地震的时空特点、地壳成矿特点等给出了理论上的解释,并按照一定的规则建立了理论地质年表和理论地磁极性年表。

图书在版编目(CIP)数据

引力、核能与地球脉动/蒋志著. —北京:地震出版社, 2001.9

ISBN 7-5028-1909-6

I. 引… II. 蒋… III. ①地球-引力-研究②地球内部-核能-研究③地球-脉动-研究
IV. P183.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 041736 号

引力·核能与地球脉动

蒋 志 著

责任编辑:姚家榴

责任校对:庞娅萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 科光彩印厂

版(印)次: 2001年9月第一版 2001年9月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 266千字

印张: 10.375

印数: 0001~700

书号: ISBN 7-5028-1909-6/P·1083 (2458)

定价: 23.00元

版权所有 翻印必究

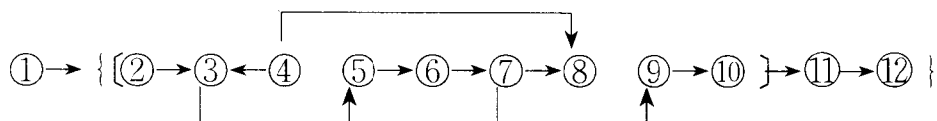
(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

关于地球脉动，过去我们曾出版过专著，但在那时基本上是以假说的方式叙述的。由于1999年理论上的突破，即用爱因斯坦引力方程的近似——达朗伯方程给出了地球引力场的脉动解，同时考虑了地球内部放射性同位素衰变能和地球外部日、月等天体的影响，较为系统地论述了地球脉动的各个方面。

由于讨论中用了较多的数学工具，而这是以描述为主的地学思维中不大喜欢的一种方式，因此不用数学写了一篇较详细的导论。在导论中，一方面介绍了本书的源起，另一方面详细地介绍了各部分的内容，对不喜欢用数学方式思考的读者，这已几乎是本书的全部；对喜欢用数学方式思考的读者，这则是全书的内容要点和各部分的逻辑关系。

由于有导论，这里就不再介绍书中的各个部分，现仅将书中各部分的关系由其编号明示如下（图中矢号表示因果关系）：



在结语中，谈了地学观察视角与认识的关系问题。

本书在成书和出版过程中，承蒙黄金指挥部领导和地震出版社的大力支持，并得到高级工程师王信虎、白万成、向永生等的具体帮助，特此表示感谢。

作 者

2000年10月9日

目 录

1 导论	(1)
2 引力方程	(15)
2.1 牛顿公式	(15)
2.2 滑塌构造	(16)
2.3 拉普拉斯方程	(17)
2.4 泊松方程	(18)
2.5 爱因斯坦方程	(19)
2.6 达朗伯方程	(21)
3 地球脉动	(23)
3.1 波数变换	(23)
3.2 密度时间变化	(23)
3.3 波数经验公式	(24)
3.4 陆壳生长	(26)
3.5 断裂、环、旋回和地洼	(27)
3.6 建表规则	(29)
3.7 理论年表 (I)	(31)
4 核发动机	(35)
4.1 核能产率	(35)
4.2 核能的转化和散逸	(37)
4.3 核能存量	(37)
4.4 核发动机	(39)
4.5 理论年表 (II)	(41)
4.6 智生宙推论	(43)
4.7 地球地质演化大阶段	(44)
5 地球表面	(47)
5.1 密度经纬变化	(47)
5.2 勒让德多项式	(48)
5.3 连带勒让德多项式	(50)
5.4 引力位的经纬变化	(51)
5.5 地外密度	(53)
5.6 重力测量的理论基础	(54)
5.7 断块、地块波浪和环	(54)
6 地球结构	(56)
6.1 地内密度	(56)
6.2 拉盖尔多项式	(57)

6.3	地球内部引力位	(59)
6.4	地球圈层界限	(60)
6.5	密度公式	(61)
6.6	密度模型	(62)
6.7	转动惯量	(64)
7	地球自转	(65)
7.1	潮汐摩擦	(65)
7.2	地球自转公式	(67)
7.3	古生物证据	(68)
7.4	自转惯性力与构造体系	(69)
7.5	力场的时间特性与全球板块运动	(71)
8	核发电机	(74)
8.1	圈层能量差	(74)
8.2	圈层相位差	(75)
8.3	核发电机	(77)
8.4	古地磁场	(80)
8.5	理论地磁极性年表	(81)
9	从长椭球到扁椭球	(84)
9.1	太阳系起源	(84)
9.2	地球形成	(86)
9.3	等势吸积	(87)
9.4	两极压缩	(91)
9.5	减速调适	(92)
9.6	地球形状变化	(94)
9.7	两极挤压力	(95)
10	扁梨形和古温度	(99)
10.1	岁差公式	(99)
10.2	地史上的黄赤交角	(101)
10.3	回归线效应: 梨形偏离和越赤佯谬	(102)
10.4	太阳常数	(104)
10.5	温度公式	(105)
10.6	古温度脉动	(106)
10.7	生物进化的阶段性	(107)
11	岩石圈和地壳	(111)
11.1	岩石圈力场	(111)
11.2	牛轭形古陆和地台	(113)
11.3	太平洋古陆和地体	(115)
11.4	裂谷和大陆漂移	(118)
11.5	海沟和环太平洋带	(122)
11.6	大陆碰撞和特提斯带	(124)

11.7	火山－地震的时空特性·····	(126)
11.8	岩石圈板块构造·····	(131)
11.9	地壳演化八重态·····	(133)
11.10	中国在全球构造中的位置 ·····	(135)
12	地壳和成矿 ·····	(136)
12.1	地壳成矿条件·····	(136)
12.2	地壳成矿幕·····	(138)
12.3	地壳成矿域·····	(139)
12.4	全球成矿·····	(141)
12.5	中国成矿·····	(150)
	结语 ·····	(153)
	参考文献 ·····	(155)

1 导 论

1.1

中国现代地质学的早期普及者、伟大的文学家和思想家鲁迅先生曾说过，其实地上本没有路，走的人多了，也便成了路。但我辈后生是在前人走出的路上走；走到没有路的地方，或者徘徊不前，或者自己走出新路，继续向前走；这样，可能步入坦途，更可能步入歧途；虽然歧途比坦途多得多，但总得有人走。

本书就是笔者走这样一条路时的见闻和思考。

首先是槽台这条路。

1873年，丹纳（James Dwight Dana，1813～1895）首先提出地槽的概念，用来表示霍耳（James Hall，1811～1898）于1859年发现的所谓“大向斜轴”；而后，1885年，修斯（Eduard Suess，1831～1914）提出与地槽相反而相成的概念——地台。从此，形成了地槽地台说，简称槽台说。地槽描述的是强烈下降并逐渐为沉积物所充填的拗陷，发育在大陆边缘。地台描述的是自形成以来未再遭受褶皱变形的陆壳稳定区，又称陆台，并根据其沉积盖层变质与否而与地盾相区别。

1940年，斯蒂尔（Wilhelm Hans Stille，1876～1967）进一步把地槽区分为优地槽、冒地槽和准地槽；1965年，奥布万（Jean Aubouin，1909～）认为优地槽和冒地槽构成地槽偶；1945年以来到80年代中期，黄汲清（1904～1995）提出了多旋回构造说，并进而提出了地槽在时间上的多旋回发展和在空间上的向海迁移特点。

地槽在板块构造中是板块的敛合边，包括海沟—岛弧系、沟弧系和大陆碰撞带三种类型。以海沟—岛弧系为例，1932年和达清夫和1949年贝尼奥夫（H. Benioff）发现了贝尼奥夫带；1960年上田诚也提出了海沟—岛弧系的热模型；1961年都城秋惠发现了海沟—岛弧系中的双变质带；1992年，笔者称地槽的这种新形式为地壳八重态的一态—海槽（蒋志，1992）。地槽已不限于原来的含义，而是洋壳消亡和陆壳生长的地方。

关于地台，1954～1956年，西尼钦（В. М. Сеницин）和别洛乌索夫（В. В. Белоусов）提出了地台活化说，认为稳定的地台还会活化，还会向地槽方向转化；1956年，陈国达提出了地洼说，实际上是一个完整的地台活化理论，但并不认为地台活化向地槽转化，而是形成一个新的大地构造单元——地洼；1959年，张文佑提出断裂构造体系，并在70年代发展为断块说，区分出X型、I型和Y型断裂构造体系；1992年，笔者根据地壳受力情况和所产生的岩浆构造旋回，进一步把地洼区分为四种类型：陆壳引张态、陆壳挤压态、洋壳引张态和洋壳挤压态，并分别称其为膨胀期陆洼、收缩期陆洼、膨胀期海洼和收缩期海洼。前面所叙的地洼其特征相当陆壳引张态或膨胀期陆洼。与此同时，笔者还将传统意义上的地台仍作为地壳八重态中的一态，仍称为地台。

第二是裂谷这条路。

1894年，格雷格里（C. W. Gregory）根据东非肯尼亚陆壳下沉的构造火山拗陷提出裂谷

概念。裂谷是深层作用的地表拗陷构造，是长达数百到数千千米的巨型构造单元。1945 年，斐伟 (A. B. Пейве) 提出了构造规模相似的深大断裂学说，并将深大断裂区分为深正断层、深开断层、深平移断层和深逆冲断层等。其中的深开断层可能与裂谷相当，深平移断层可能和后来的转换断层相当。

1956 年，希曾 (B. C. Heezen) 和尤因 (W. M. Ewing) 发现了大洋中脊和裂谷带，是长 6.4 万 km、宽 1500~2000km 的更大规模构造。这种巨大的海底构造与大陆裂谷带有很多相似性，只是发育程度不同，大陆裂谷可能是大洋裂谷的萌发态。1958 年梅森 (R. G. Mason) 发现了沿大洋中脊两侧对称的、正向剩余磁化与反向剩余磁化交替出现的条带状磁异常；1960 年赫斯 (H. H. Hess) 和 1961 年迪茨 (R. S. Dietz) 分别提出了海底沿大洋中脊向两侧扩张的学说；1963 年，维尼 (E. J. Vine) 和马修斯 (D. H. Matheus)、莫利 (L. W. Morley) 和拉罗什尔 (A. Larochelle) 分别用海底扩张机制解释了海底条带状磁异常，为海底扩张提供了证据，为海底条带状磁异常提供了产生机制；1965 年，威尔逊 (J. T. Wilson) 发现了转换断层，为海底扩张提供了力学机制。这同时也是大陆裂谷张开的机制。海底运动的更直接证据是 1968 年海尔茨勒 (J. R. Heirtzler)、迪克森 (G. O. Dickson)、赫伦 (E. M. Herron)、皮特曼 (W. C. Pitman) 和勒比雄 (X. Lepichon) 等发现的夏威夷岛链—皇帝火山链上的时间-距离关系，并可求得海底每年以数厘米运动的速度。这样，大陆在裂谷处断开，大陆裂谷发展为大洋中脊裂谷，洋壳从其中产生，并向两侧扩张就成为一个系列。由于裂谷是陆壳破裂、洋壳诞生的地方，1992 年笔者称裂谷的初始形态——大陆裂谷带为陆槽，称其发展态——大洋中脊和裂谷为海岭，成为地壳八重态的另二态 (蒋志，1992)。

第三是圈层差异运动这条路。

海底扩张显然是洋壳对地幔的一种圈层差异运动，或准确地说圈层局部差异运动。

实际上地球圈层局部差异运动发现较早，早在 1620 年，培根 (Francis Bacon, 1561~1626) 就提出美洲、非洲和欧洲连接的可能性；1668 年普拉赛 (R. P. F. Placet) 也认为大洪水前，美洲和其他大陆是相连的；1912 年魏格纳 (Alfred Lothar, Wegener 1880~1930) 提出了大陆漂移说；1926 年，李四光 (1889~1971) 提出大陆车阀说，认为地壳硅铝层会因地球自转变化而相对硅镁层移动；1928 年，霍姆斯 (A. Holmes) 提出了大陆漂移的地幔对流机制；1957 年，朗康 (S. W. Runcorn) 从欧洲和北美岩石古地磁极中推断出两大陆曾沿纬线东西平移 30 个经度；1972 年，摩根 (W. J. Morgan) 针对霍姆斯地幔对流的问题，提出了热点和地幔柱说，又称大地幔对流，成为能很好解释整个大陆漂移的机制。再加上前述海底扩张机制，大陆漂移才成为可能。

另一个层次的圈层差异运动是地幔对地核的差异旋转。20 世纪初，爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879~1955) 曾认为地磁场的起源是最大的物理学之谜。1904 年和 1906 年，达维德 (P. David) 和布容 (J. Brunhes) 先后发现岩石中的反向磁化；1926 年，梅康通 (P. L. Mercanton) 发现岩石中的反向磁化是由地磁场倒转引起的；1958 年，梅森 (R. G. Mason) 发现海底条带状磁异常；1964 年，考科斯 (A. Cox) 提出了地磁场倒转年表。

为了解释地磁场倒转，1975 年斯迪贝克 (M. Steebeck) 等、1981 年古宾斯 (D. Gubbins) 等、1982 年蒋志、1984 年塞兹图 (A. M. K. Szeto) 等相继独立提出了地幔和内地核之间的差异旋转机制，其中蒋志还提出了与考科斯地磁极性年表一致的理论地磁极性年表；1986 年毛瑞利 (A. Morelli) 等和伍德豪斯 (J. H. Woodhouse) 等分别提出了内地核的各向异性，1992 年科里格 (K. C. Creager) 观测到地核的地震走时异常，1993 年宋晓东等证实内地核有很强的各

向异性，同年，特鲁普（J. Tromp）用这种各向异性解释了自由震荡异常谱分裂的观测资料，终于证实了内地核的不对称性；1995年，戈拉兹麦尔（G. A. Glatzmaier）等预测内地核相对地球旋转每年快几度，1996年宋晓东等发现内地核旋转每年比地球旋转快约 1° ，终于发现了核-幔的差异运动。应指出的是，蒋志1981年还发表了关于地球圈层界限的整数平方规律：以地球半径的 $1/15$ 为长度单位，则地心的坐标为 $1 \times 1 - 1 = 0$ ，内、外地核的界限的坐标为 $2 \times 2 - 1 = 3$ ，核、幔界限的坐标为 $3 \times 3 - 1 = 8$ ，地壳的坐标为 $4 \times 4 - 1 = 15$ ，并指出这虽是个经验规律，可能有甚深的物理含义。

为了解释上述地球的基本地质现象，曾先后有三种学说出现。

第一种学说是地球收缩说。

1829年，博蒙（Elie de Beaumont, 1798~1874）提出地球因冷却收缩而导致地壳周期性塌陷、褶皱的收缩说，由于能够解释地槽、地台和预言推覆构造而风行一时（阿德里安·夏德格，1997）。

第二种学说是地球膨胀说。

20世纪20~30年代之间，林德曼（B. Lindeman）和希尔根贝格（O. C. Hilgenberg）分别提出了地球膨胀说，认为地球内部热能积累，特别是放射性同位素核转变能的积累而导致地球膨胀，较好地解释了大陆破裂现象。这种学说后因海底扩张的发现而引人注目。关于地球内部放射性同位素核转变能的作用论述以侯德封等1975年出版的专著《核转变能与地球物质演化》最为完整。

第三种学说是地球脉动说。

1933年，布克（W. H. Bucher）提出了地球周期性收缩和膨胀的地球脉动说，1936~1938年间，格雷博（A. W. Grabau）根据地层变化所显示的海水进退也提出了地球脉动说。从逻辑上讲，地球脉动说兼顾了地球收缩说和地球膨胀说两者的优点，应是个有前途的学说。

笔者的工作，就是从地球脉动开始的，叙述如下：

1968年，潘内拉（G. Pannella）、麦克林托克（G. MacClintock）和汤普逊（M. N. Thompson）从瓣鳃类化石中发现其生长层随地质时代的推移而减少，推知地球自转在不断减慢，每个世纪日长大约增加1ms。作者在他们的工作中发现了地球自转还有周期性变化，近期的周期大约为3亿年左右（蒋志，1981）。

1976年，蒋匡仁发表了《地球运动周期性之初探》，对地球上的岩浆构造旋回、海水进退变化、气候冷暖变化、生物进化的大阶段进行了总结，并给出一个经验性的螺旋公式，描述了地球脉动的大观（蒋匡仁，1976）。但从这个螺旋公式看，今后地球脉动尽管可以有无穷个周期，却走不出未来4.1亿年。为了解决这个问题，作者提出了另一个经验公式，既包含近期地球脉动的3亿年周期，又不会使地球脉动囿于未来4.1亿年。用这个公式不但可以同样表示那些地球地质周期，而且可以据以建立从太古宙到显生宙的理论地质年表。公式本身还可以用银河系密度波理论解释。这就是笔者1981年发表的关于地球脉动的第一篇论文——《地球在银道面上运动与理论地质年表》的主要内容。在这篇文章中，还发表了地球内部圈层界限的整数平方规律，地球脉动与地质力学和与板块构造的关系以及与古温度脉动的关系等（蒋志，1981）。

以此为起点，作者发表了一系列关于地球脉动的研究结果，如《核-幔差异运动与地磁场倒转》（1983）、《地表能量平衡与古温度脉动》（1983）、《陆壳生长的概率模型》（1984）、《全新世理论地质年表》（1984）、《地球脉动与金成矿》（1989）、《地壳演化的八型态模式》（1992）、《地球内部热能积累》（1995）、《地球内能的改造作用》（1995）、《地球形状变化》（1995）、《两极挤

压》(1995)、《中国金成矿的大地构造背景》(1995)、《地幔脉动与地质现象》(1998)、《中国矿床的成矿时空和发现过程》(1999)等,并于1995年在科学出版社出版了专著《地质体运动理论及其应用》一书,该书分两部分,第一部分即为地球脉动学说。

不过,从70年代末到90年代末,萦绕于心的仍然是这样的三个问题:地球何以脉动?地球脉动的能量背景到底是什么?地球不同圈层之间为什么会差异旋转?对于这样的问题,即地球地质运动的问题,许多人却做了哲学式的回答:吸引和排斥的对立统一,引力和热能的对立统一,复杂的系统问题,等等,不一而足。

当然,地球地质运动最终要归结到引力、热能和地球自转上去。例如,引力和地球自转所形成的重力就是构造的原因,马杏垣(1919~2001)于20世纪70年代末曾形象地把重力的构造作用归结为“抱球”和“找平”四个字;引力方程的经纬方向解是由球谐函数构成的,地球表面则有所谓谐和山;重力引起的滑塌构造随处可见;固体潮是日、月引力和地球引力相互作用的结果等。而热能特别是放射性同位素核转变能在地球中的积累更为许多人所注意,其中迄今最完整的讨论是侯德封、欧阳自远、于津生1974年出版的《核转变能与地球物质的演化》一书,而在讨论笔者的《地质体运动理论及其应用》书稿时,欧阳自远教授提示说,为什么不从地球内部核转变能的角度讨论地球脉动?为此,笔者加写了两节,给出了这项能量的存量,以及地球脉动频率经验上与它的7次方成正比的初步看法;以后又在笔者主编的1996年出版的《中国地壳演化与矿产分布图集》中把这个认识修改为:地球脉动频率经验上与这项能量存量的5次方成正比(蒋志,1995,1996)。本书将进一步讨论这个问题。至于地球自转对地球地质过程的影响前面我们已提到了李四光的大陆车闸说。在这个问题上,笔者是从地球脉动角度看问题,认为地球收缩时,地球自转加快,地球膨胀时,地球自转变慢;对于具体的区域来说,升高的陆块将向西向极挤压,降低的陆块将向东向赤挤压,特别是球谐函数所显示的扇、带和田状区域及其交界处将是重要的构造现象发生的地点,甚至会表现出与田球谐函数很像的波浪状地块镶嵌结构,这种方向性很强的水平力场同时会导引热能,推动大陆形成、破裂和漂移,等等。

地球脉动的第一参量是时间,通常的引力公式和引力方程并不显含时间,为此我们想到了牛顿(Isaac Newton, 1642~1727)引力方程。但对地球这个小小天体来说,用广义相对论讨论又有用牛刀宰鸡之嫌,因此,笔者从福克(B. A. Фок)1955年对爱因斯坦方程近似时所得到的用达朗伯(Jean le Rond d'Alembert, 1717~1783)姓氏命名的方程来讨论地球的脉动问题,并从核转变能的存量给出脉动频率的表示,不但为地球脉动找到了能源,而且给出了地球脉动解和地球内部圈层结构界限的整数平方规律。这是笔者1999年的工作,约1/4世纪的努力,终于有了结果,写成《地球引力场的脉动解》,发表在地质学报为第31届国际地质大会出的专刊(Pulsation Solution to the Equation of Earth's Gravitational Field (Main Outcome), ACTA GEOLOGICA SINICA, vol. 74 No. 2 (2000) 297~300)上。本书就是通过详细讨论地球引力场的脉动解而展开的,从2到12共11个部分。

1.2

被认识的事物虽然是内部有联系的美妙客体,但认识的过程却是随机的、杂乱的,对事物不同方面的认识并没有可遵循的一定顺序。在对事物认识大体告一段落,事物的主要面貌已清晰可辨后,总结认识时则要有一定的顺序,要遵守一定的逻辑关系。这本身也是对事物的一次认识。在以下的11个部分叙述中,我们遵守的前提是,如果前面的部分与后面的部分有联系,且能为

后面部分提供前提的尽量放在前面叙述；此外，为了更便于以后的讨论，我们将在这里先尽量清晰地给出每个部分的和整体的地质图景或物理图景，以及各个部分在整体中的位置和联系。

关于引力方程。

我们引入了牛顿万有引力公式：两个质点之间的引力与两个质点的质量乘积成正比，与两个质点的距离的平方成反比，这是众所周知的中学物理内容。根据万有引力公式，讨论了滑塌构造的物理机制：重力的水平分量驱使物体从高处向低处位移，产生滑塌。从万有引力公式出发，给出引力位概念，并给出质点外引力位所遵循的拉普拉斯（Pierre Simon Laplace, 1749~1827）方程。众所周知，牛顿万有引力公式是两个质点间的引力公式，这是非常理想、非常特殊情况下的引力具体现象。对于众多质点或成层分布质量，如何表示它的引力呢？最好的方式是描写一定时刻一定空间点上的引力位。如果能做到这一点，则我们就可以描写所有时刻中所有空间点上的引力位。而微分方程或偏微分方程就能做到这一点，因为这种方程是描写一般规律的，在特定条件下这种方程的解答才是描写具体规律的。拉普拉斯方程就是这样的一种偏微分方程。拉普拉斯方程是描写质量密度为零的空间点上引力变化的，自然可用在描写地球以外的地球引力场。但不能用于描写地球以内的引力场，因为地球以内每个空间点上的质量密度都大于零。为了描写这种情况，我们引入了泊松引力方程。泊松引力方程是拉普拉斯引力方程的推广，与拉普拉斯方程比，多了一个空间点的质量密度项。如果空间点上的质量密度为零，则泊松方程就回到拉普拉斯方程。这样，无论空间点上质量密度是否为零，泊松方程都能应用。但泊松方程也有局限性，如果特定空间点的质量密度随时间变化，则泊松方程就不适用了。为了描写质量密度在时间和空间中都变化的情况，我们引入了爱因斯坦引力方程。爱因斯坦引力方程虽然能描写一般情况下的引力变化，但由于数学工具的复杂性和地球这个小天体的引力特点，我们希望有描写引力的更简单的方程，这就是爱因斯坦方程的一种近似形式——达朗伯方程。达朗伯方程本来是描写电磁的，但福克在讨论爱因斯坦方程时所得到的近似式就是达朗伯方程或达朗伯引力方程，即达朗伯方程同时还可描写引力现象。达朗伯方程与泊松方程比，多了一个时间的二阶偏导数。如果在狭义相对论问世时就推广泊松方程，得到的可能就是达朗伯方程。有了含有时间和空间变量的引力场方程，我们自然就可以讨论在时间空间中脉动的地球。因为所谓地球脉动无非就是在不同的时间、不同的经度和不同的纬度上地球半径的周期性变化。

关于地球脉动。

如果我们认为地球内放射性同位素核转变能的积聚和散逸是地球脉动的重要原因，在解引力场方程时就要考虑这个问题。在数学上往往是把几种方程联立求解，我们采取的方式是在解引力方程时为热能的作用留下余地，以便另行考虑热能的问题。为此，我们对达朗伯方程进行了坐标变换，所变换的坐标是时间坐标。我们把时间坐标变换成地球脉动波数坐标。所谓波数，就是地球自形成以来脉动的周期数，在一般情况下，波数是脉动频率与时间的乘积。在我认为，脉动频率可能也随时间变化，因此，我们是用频率的时间积分表示波数的。这样，变换后达朗伯方程的坐标分别是三个空间坐标（上下、左右、前后）和一个与时间方向相同的波数坐标。为了解这个方程，我们引入的第一个假设是，引力位与地球物质密度具有同样的时间变化方式，或者说，引力位函数可以写成时间函数和空间函数的乘积，地球物质密度也可以写成时间函数和空间函数的乘积，两者的时间函数相同，两者的空间函数不同。这样，就可以把达朗伯方程分离为仅含空间函数的部分和仅含时间函数的部分，而写成两个方程。其中，空间部分留待后面求解，时间部分的解答恰恰是一个波动函数。这个波动函数是在波数坐标上的一系列正弦波或余弦波的叠加，具有波的一切特征。这是 20 世纪末我们在理论上的一个重要成就，即地球引力位中含有波动成分。

这个波动成分虽然在波数坐标上表现为简单的三角函数——正弦或余弦，但波数是什么，还需要由经验确定。前面已经讲过，我们确实得到过波数的经验表示，但那时是硬加到地球上的，现在是地球引力位中包含波数，即使是经验上的波数，也变得合情合理了。这个经验波数主要是根据地球地质过程中的岩浆构造旋回和同位素地质年表得出的，有可靠的经验基础。如果认为陆壳是在地球不断脉动中从海槽中生长的，那么，陆壳生长比率应与经验波数成正比，事实确是如此。地球脉动使得地壳和岩石圈的曲率不断变化，地球膨胀时曲率变小，地球收缩时曲率变大，应在地壳、岩石圈的构造中有所表现。首先是地球收缩时的侧向挤压和膨胀时的侧向引张，容易使地壳交替出现张文佑所指出的 X-型断裂构造体系和 I-型断裂构造体系及其之间的过渡类型 Y-型断裂构造体系；其次是对陆壳来说，由于其上为硅铝层、下为硅镁层的双层结构，这种挤压、引张交替的后果是收缩时上张下挤利于硅铝层底部生成酸性岩浆并上升喷发，膨胀时上挤下张利于深部基性超基性物质上升，而出现以中酸性岩浆活动为主与以基性超基性岩浆活动为主的交替；这种岩浆构造旋回的存在，势必出现地壳的不同改造方式交替出现。所谓地壳的不同改造方式，就是我们前面所谈的收缩期陆洼和海洼、膨胀期陆洼和海洼。而陈国达所提出的地洼主要是指陆壳引张态即膨胀期陆洼；地球脉动引起地球表面这个球面曲率变化的最可能现象是地球表面上的环形挤压和环形引张，其形迹可能就是遥感解译中发现的大量环形构造。从经验上看，引力位脉动成分中 2 倍周期或 8 倍周期表现明显，并在地球脉动极大值、极小值和快速收缩期、快速膨胀期表现不同。我们提出了应用波数公式建立理论地质年表的四个规则：规则一是确定较大地质时间单位大小的二倍规则，规则二是确定相邻同级次地质时间单位界限的规则，规则三是同位素地质时间单位在上述脉动特殊点前后的分布规则，规则四是确定较小地质时间单位的八倍规则。根据这四个规则，我们用波数经验公式建立起了太古宙、元古宙和显生宙的理论地质年表，这些理论地质年表与同位素地质年表是一一对应的，这是地球脉动说的一个重大成就，在世界上首次用一个公式通过计算建立起地质年表。

关于核发动机。

经验波数公式是从地质旋回和同位素地质年表中总结出来的，其物理背景或物理机制并不明确。前面我们已经指出，我们曾试图用放射性同位素衰变能解释这个问题，并曾给出这些核能的产率总和的经验公式，进而考虑其不仅积累，而且散逸的特点，给出存量公式，并于 1995 年和 1996 年分别发表了用这项存量的七次方和五次方表示地球脉动频率的想法，其中类比的成分非常大，只能是猜想。本书关于这个问题虽仍有相当的类比，但是却在努力运用现有的物理学成果进行讨论。首先，核能产率的表达式不再用核能产率总和的经验表达式，而是用 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的放射衰变能产率公式直接计算；其次，核能存量公式中也是直接用这四种放射性同位素的核能产率和总的散逸率进行计算；第三，所谓的核发动机是指核能发动机，所用的机制是把地球看成为宇宙空间中的一个“黑体”，其表面的辐射强度或热流强度应与地球这个“黑体”的绝对温度的四次方成正比，这是已被证明了的物理定律——斯特藩-玻耳兹曼辐射定律。由于地球脉动是个耗能过程，地球脉动频率越高，耗能越大，既应有更大的热能存量来保证，也应表现为从地球表面向宇宙空间散逸的热流量更高，因此我们认为，地球脉动频率随热能存量的变化应与地表热流成正比，即应与地球这个“黑体”绝对温度的四次方成正比。而地球这个“黑体”的绝对温度又与地球内部热能存量成正比，从而有地球脉动频率随地球热能存量的变化与地球热能存量的四次方成正比，或者说，地球脉动频率与地球热能存量的五次方成正比。这表明 1996 年我们发表的关于这个问题的猜想是有一定道理的，而 1995 年发表的相应猜想则纯粹是猜想。当然，为了确定所得公式中的参数，还要直接凭借经验，主要是我们 1981 年发表的波数经验公式。根

据已确定的波数公式，根据前面的四个建表规则，重新建立了一个新的理论地质年表，由于这个理论地质年表是以地球内放射性同位素核转变能和地球引力场脉动为根据的，因此，这是对以前理论年表在理论上的修正。两者基本相同，不同的地方在“核发动机”部分中进行了讨论。这里要指出的是，两者最大的不同是在对地球地质过程未来发展的描述上，经验波数公式给出的图景是，地球的脉动频率越来越大，经过无穷个周期直到永久；这里给出的理论波数公式在已过去的时期与经验波数公式一致，在未来的时期，地球脉动波数增加到一定值后，又将逐渐趋于常数，直到地球虽还存在，地球脉动却将停止，那时地球的热能存量已变得很小了。总的情形是，包括已过去的宙和代，地球地质演化的大阶段总共只有 21 个宙和 41 个代，正像地球形成初期的宙和代延续时间很长一样，地质演化最后阶段的宙和代延续的时间更长，甚至达到永久或与地球共同终结。从地球脉动需要能量驱动来看，这显然是更合理的图景。

关于地球表面。

在地球脉动部分，我们已将达朗伯方程分为两个方程，一个方程是含波数的方程，已给出解答，并进行了讨论；另一个方程是含三个空间坐标的方程，还没有给出解答。现在，我们进一步讨论这个还没有给出解答的方程。这个方程中的三度空间变量是上下、左右、前后，这是从地心的角度看的。上下是沿极轴或旋转轴的方向，左右和前后都在赤道平面中，但左右方向和前后方向必须互相垂直，也就是说这是个直角坐标系。描写地球这个球，最方便的不是直角坐标系，而是极坐标系或球极坐标系。我们现在对地球的描述就是用的这样的坐标系，譬如，经度是地球表面的东西方向，纬度是地球表面的南北方向，深度是地球的半径方向。为了计算的方便，在数学上不用纬度和深度作方向变量，而用极距角和地心距作方向变量。极距角是从北极到南极之间划分 180° 或 π 弧度，地心距是从地心向地表的距离。粗略地说，它们的关系是，如果以北纬为正、南纬为负的话，极距角等于 90° 减去纬度；地心距则是地球半径减去深度。这样，球极坐标就是以地心距、极距角和经度为变量的空间坐标系。把上述空间部分的方程从直角坐标系变换到球极坐标系，则可引入关于地球质量密度的第二个假设，密度的经纬变化与引力位的经纬变化相同。这个假设是说，空间部分的引力位可以写成地心距函数和经度与极距角函数的乘积；空间部分的密度也可以写成地心距函数和经度与极距角函数的乘积；两者的不同仅表现在地心距函数上，经度与极距角函数是相同的。在这个假设下，我们可以把空间部分的方程分离成只含地心距的部分和只含经度与极距角的部分，可分别称为径向方程和经纬向方程。为了解答经纬向方程，还可将其分离为只含经度的经向方程和只含极距角的纬向方程。为了解答经纬向方程，必须先解答经向方程。经向方程的解很简单，只是正弦函数的叠加或余弦函数的叠加。给出经向方程的解后，纬向方程的解答则较复杂，它的解有两类，简单的一类是用勒让德多项式表达的，复杂的一类是用连带勒让德多项式表示的。该解与经向解联合起来，构成球谐函数。用前者构成的球谐函数，为带球谐函数；用后者构成的球谐函数，为田球谐函数和扇球谐函数。所谓带球谐函数，是把地球表面按纬度分成若干环带，带球谐函数值在这些带中的分布是正、负相间出现的；所谓扇球谐函数，是把地球表面按经度分成若干扇形带，扇球谐函数值在这些扇中的分布也是正、负相间出现；田球谐函数则是把地球表面按经度和纬度分成若干个田字形的区域，田球谐函数值在这些田字形区中的分布是上、下、左、右都各为正、负相间出现。从球谐函数的这种变化看，显然可以用球谐函数表述任何经纬度上的地质变化，如地形变化、地层岩石变化、构造分布等。现在我们引入关于地球质量密度分布的第三个假设，固体地球以外的密度为零。这样，可以通过径向方程，求得固体地球以外的引力位径向变化，从而给出固体地球表面引力位的公式，并成为重力大地测量的理论基础。上述带球谐函数、扇球谐函数和田球谐函数的零值成了划分地球表面纬向

带、经向扇和经纬田状域的分界线，并成为正、负区的挤压或引张界限，既可成为地壳-岩石圈不同断块的界限，也是不同地块波浪的界限，并且使地球表面的环形构造有了方向性。

关于地球结构。

现在，只剩下固体地球内部的径向方程等待我们去求解。为了得到这个条件下的解答，还必须了解固体地球内部引力位与质量密度的关系。对这个问题，我们实在知之甚少，只能做些极端的推测，例如，在地球中心处，引力位应该为零，密度却比地球的任何地方都大，那里的质量密度与引力位比值为有限值被零除应为无穷大；固体地球表面，物质密度有限，引力位也有限，两者的比值既不为零，也不会是无穷大，应是有限值。因此，从地心到固体地球表面，最简单的质量密度与引力位的比值可表示为地心距去除一个常数，再减去另一个常数。这另一个常数与固体地球半径的乘积要小于前一个常数，以保证地球表面处质量密度与引力位的比值是一个大于零的有限值。这是关于地球内部质量密度的第四个假设。由于地球内部引力位不会趋于无穷大，应用这个假设解径向方程，会得到用拉盖尔多项式和连带拉盖尔多项式表示的解答。拉盖尔多项式和连带拉盖尔多项式给出的图景是地球在径向上是分成圈层的。把这个解答与前面经纬向方程的球谐函数解、波数方程的波动解联合起来，就得到固体地球内部引力位的一般解答。这个一般解答为我们描绘的地球图像是，地球引力位或地球在径向上分成圈层、在经纬方向上类似驻波、在频数坐标或时间上脉动。这是笔者多年的理想——理论设想，而终于实现了并从理论上得到了它。利用这个结果，立即可以求得每个圈层极大值的地心距与整数 1, 2, 3, 4 的平方成正比，比例恰为地球半径的 $1/15$ ；同时可求得圈层界限的地心坐标在以地球半径 $1/15$ 为单位时分别是 $1 \times 1 - 1$, $2 \times 2 - 1$, $3 \times 3 - 1$, $4 \times 4 - 1$ ，所对应的分别是地心、内外地核的界限或莱曼面、核幔的界限或占登堡面、地表或康拉德面。同时，根据前述关于地球质量密度的四个假设，可以立即从这个解中给出地球质量密度的理论公式。利用地球内部圈层界限的整数平方关系，我们给出了固体地球内部质量密度分布的模型。这个模型比理论公式要简单明了，用来计算地球质量和转动惯量时，与观测值仅有 0.2% 的偏差。特别是，所给出的转动惯量等于地球质量与半径平方的乘积再乘上一个理论常数，所谓的 0.2% 偏差，就是这个理论常数的计算值与卫星观测值的相对偏差。这样，地球脉动对地球转动惯量的影响就只与地球半径的脉动有关了，而不必再详细考量地球内部的情况。应当指出的是，在这个关于地球引力位的解中，不同的圈层有不同的脉动位相，为我们讨论地球不同圈层的差异旋转提供了理论前提。

关于地球自转。

地球脉动会因角动量守恒原理而影响地球自转，当地球膨胀时，地球自转会变慢；当地球收缩时，地球自转会变快。因此，地球脉动会引起地球自转呈周期性变化。如果把地球引力场的时间变化视同地球半径的相应变化，则可得到地球半径的脉动公式。地球半径的脉动虽然会因经度和纬度的不同而表现出球谐函数所给出的空间变化，但对地球自转来说，这些经纬变化都将被平均掉，只剩下随时间的变化。根据角动量守恒原理，地球自转角动量是地球转动惯量与地球自转角速度的乘积，应为常数；而前面的讨论表明，地球转动惯量与地球半径的平方成正比，因此，地球自转角速度与地球半径的平方成反比，即地球半径脉动时，地球自转角速度也随之表现出位相相反的脉动。地球自转不仅因地球脉动而变化，还因太阳系天体的潮汐影响而变化。地球上的潮汐现象是人们熟知的事实，引起地球潮汐的因素主要是月球和太阳的引力，其他行星的引力虽有影响，却很微小。天体对地球的潮汐作用与天体的质量成正比，与天体和地球距离的立方成反比，月球距离近，潮汐作用强烈，太阳质量非常大，潮汐作用也强烈。这种潮汐作用对地球自转的影响是使地球自转变慢，目前的效应大约是每个世纪使日长加长 1ms 左右。据此，我们给出

一个地球自转随时间变慢的因子。这样，我们给出的地球自转角速度公式就包含两种主要影响因素：一种因素是地球脉动影响；另一种因素是日、月潮汐摩擦影响。这样的公式虽给出了脉动周期和时间变化趋势，但脉动的幅度还没有确定，还要根据一定的观测来确定这件事。1968年，潘内拉等发表了他们的发现，他们在研究瓣鳃类化石的生长层时，发现显生宙以来朔望月的天数逐渐减少，减少的趋势大体上是每个世纪日长增加 1ms，与潮汐对地球自转的影响一致；1976年笔者看到这个观察材料时，进一步对其做了处理，如果把地球半径用 1 表示时，则脉动的最基本项的幅度为 0.0075。这样，趋势项和基本脉动项之和，与观测吻合得很好。从这个脉动幅度看，地球的平均半径应是 6324km，现在地球处在膨胀阶段；地球脉动时最大半径和最小半径可相差 94.9km；目前地球半径开始由极大值向极小值转化；每年约减少 0.16mm；地球表面引力脉动幅度约为 3%，现在每年约增加 10^{-11} ；假定海水体积不变，地球脉动引起的海深变化约为 157m。根据目前的观测水平，这样的变化显然是可能的。有了地球自转角速度公式，我们可以讨论一系列问题。其中之一是自转惯性力与构造体系的问题，这主要是地球表面南北方向上的惯性离心力和东西方向上的纬向惯性力，这两种力虽然本身不很强，但可以随时间积累，可以引导方向性不明确的强大的热能，加上球谐函数对地球表面的划分，足以形成李四光所指出的那种巨大的构造体系——经向构造体系和纬向构造体系。我们的分析表明，这些构造体系大都出现在反复出现挤压和引张的球谐函数零值带附近。应指出的是，只有不断变化的力场，才会不断引起新的地质作用，因为改造建造作用在不断地平抑所发生的变化，从一种平衡走向另一种平衡，不断的变化，才会不断的失衡，又不断达到新的平衡。地球自转变化的另一个问题是，地球水平力场在地史上的变化时期，根据所得到的地球自转角速度公式，可以求得在地球自转减慢、地表水平力场总体向西向极的趋势中，前 10 亿年前后，地球出现第一次自转加速期；前 6 亿年前后，出现了第二次自转加速和向赤道的水平力时期；前 2 亿年前后，出现了第三次自转加速和向赤道向东的水平力时期。这恰恰与前 6 亿年前后古大西洋张开，前 4 亿年前后古大西洋闭合，前 2 亿年前后古大陆开始破裂漂移的时间相合。也就是说地球自转变化导演了大陆破裂、开张、闭合、漂移的地球内部热作用过程。

关于核发电机。

有了地球自转角速度公式，我们就可以讨论固体地球内各圈层的旋转问题。首先，引起地球脉动的放射性同位素衰变能在地球各圈层中的分布相差很大，根据各圈层这些放射性同位素的含量，可以估算出现今地球各圈层核转变能的产率为：地壳为 1 时，上地幔、下地幔和地核分别为 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{133}$ 和 $\frac{1}{2250}$ 。这样大的核能产率差，势必导致各圈层热能存量的不同。因此，在地球脉动中，各圈层的脉动幅度可能不同；根据角动量守恒原理，不同的脉动幅度，必然会引起自转角速度的不同变化，从而产生差异旋转。在讨论地球结构时，所得的引力位公式中，各圈层的脉动位相不一致，可表示为 $\frac{30}{n}$ ，即内地核（ $n=1$ ）的位相为 30 弧度；外地核（ $n=2$ ）的位相为 15 弧度；地幔（ $n=3$ ）的位相为 10 弧度；地表（ $n=4$ ）的位相为 7.5 弧度，去掉 2π 的整数倍弧度，分别为 4.8673、2.4336、3.7168 和 1.2168 弧度；转换为度数分别为 278.86°、139.43°、212.94°和 69.73°。其中，内地核和外地核的位相相差 139.43°，几乎相反。也就是说，内地核膨胀时，外地核在收缩，两者之间将处于挤压状态；内地核收缩时，外地核膨胀，两者之间将处于引张状态。这表明内地核自转减速时外地核自转加速，并且，两者牵制较强；内地核自转加速时外地核自转减速，并且，两者之间牵制较弱。由于内地核的固态金属属性、外地核的流塑态金属属性，这种一个加速另一个减速的运动相当外核围绕内核时而东向转、时而西向转，正如一台交

流发电机的情形，致使在两极所产生的磁场的磁极也在交变，而形成地磁场倒转。从能量上看，这是用核转变能驱动发电机；从机制上看，这是用地核做转子在发电，因此，无论从哪种意义上讲，都可以把地磁场倒转的产生机制称为核发电机，其意义为或是核能发电机，或是地核发电机，都是核发电机。用这个模型，既可解释地史上大规模的磁极变化时期，例如，侏罗—白垩时期的正向为主的地磁场和石炭—二叠时期的反向为主的地磁场，也可以根据前述理论地质年表的建表规则，建立起理论地磁极性年表。我们所建立的理论地磁极性年表不仅与考科斯根据地层中地磁变化建立的地磁极性年表一致，而且是自 1982 年提出并于 1983 年发表后世界上唯一的一个这种年表。

关于从长椭球到扁椭球。

地球只要旋转，它的平衡形状就应该是扁椭球；并且，随着地球自转变慢，地球的形状应该由扁椭球向圆球的方向变化；只有地球停止旋转，它才能变成圆球。但李鸿业等为什么提出地球形成初期甚至到显生宙还是长椭球呢？这要从地球形成时的特点说起，他们举的例子也是小天体多为长椭球（李鸿业，1993）。地球形成时有没有使地球形成长椭球的条件呢？这确实是个值得讨论的问题。为此，我们回顾了各种关于太阳系形成的假说，并且指出，前面我们关于地球内部引力位的讨论如果用于太阳系原始星云，也是个能说明相当多事实、避免相当多困难的一个方案。地球从太阳系一块星云中形成的过程，戴文赛等进行了详细的讨论，并给出了时间公式。我们分析了那个公式，所得到的结论是地球的形成过程可以更加简单地表述为：形成中的地球质量越大，吸积星云中的物质越快，地球质量的增长速度越快；待吸积的星云质量越大，地球质量的增长速度也越快。这种近于哲学的论断，也得到了同样的时间公式。地球形成的具体过程是，形成地球的那团星云，一边在中心吸积、一边旋转，所导致的结果是，吸积中心周围的引力与所吸积的质量成正比，应成球对称分布；但吸积中心的旋转作用，又使围绕中心的重力等值面成长为椭球状，其长轴与旋转轴一致，这是因为在垂直旋转轴的方向离心力在抵消引力的作用，在两极的方向，只是引力在起作用。可以设想，吸积中心从星云中吸积物质，应当沿等重力面进行等值吸积，长椭球状的重力等值面必然使吸积所成的原始地球为一长椭球。为了验证这个理论结果，我们对太阳系小天体的资料进行了处理，具体给出了地球形成过程中极赤半径比随前述吸积时间的变化情形，并称之为吸积过程。地球的形成时间只有百万年的数量级，与 45 亿年的地球历史比，只是一个瞬间。在地球形成后，立即发生的过程应是由长椭球向扁椭球转变。因为只要地球旋转，就必然出现这个过程。我们考虑了地球圈层结构的初始性，并考虑了地球自转变慢，得到了关于地球从长椭球变为扁椭球的时间过程，并因其主要表现是两极挤压而称之为两极挤压过程。在地球成为扁椭球以后，才是随着地球自转速度继续变慢，地球形状由扁椭球向圆球转变的长期过程，并称其为自适调整过程。这些讨论的最后结果是，地球形成时极赤半径比约为 1.27；地球形成后到前 18 亿年，地球极赤半径比由 1.27 下降到 0.995 左右；18 亿年以来，地球的极赤半径比已从 0.995 上升到现在的 0.99665。也就是说，18 亿年以前，极半径大于赤半径；前 18 亿年前后，极半径变得小于赤半径；自那时以来，极半径又在向赤半径靠拢。应指出的是，这些讨论表明，地球早在 18 亿年以前已由长椭球变成了扁椭球，显生宙不可能还存在长椭球的情况。根据地球由长椭球变为扁椭球的时间过程，我们计算了地表的两极挤压力，其水平分量最高值可达到地球引力的 $1/10$ ；并且，这种两极挤压水平分量在南北纬 45° 附近最强，在赤道和两极为零，在地球形成初期最强，到前 18 亿年前后先由指向赤道变而为零，后转而指向两极，不过，在这个时期及以后的时期，已非常微弱。可见，两极挤压力的水平分量可能是地球形成后 28 亿年中地球上的主要水平作用力，那个时期的地质过程大都可由此得到说明。