

大陆壳的演化 及其动力学

谢鸣谦 编著



科学出版社

大陆壳的演化及其动力学

谢鸣谦 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

地球的熔融导致了地球圈层的分异,也提供了地球萌生的可能,根据同位素年代学和岩石学确定了全球五个生长点的存在,也是古老岩体如高级变质地体、绿岩带、斜长岩地块及片麻岩穹窿等的分布区,地壳的发展从这里开始,地壳的演变分七个阶段,是以联合大陆的形式表现出来。应提出的是,从联合大陆的形成开始,就出现了陆间海(地中海),这是特提斯的前兆,因此特提斯的由来已久,人们常说的原特提斯、古特提斯、新特提斯已不复存在。关于地球动力学,海洋板块和大陆板块的驱动力截然不同,前者以海洋板块中脊处的岩浆添加作用为驱动力,后者以地球的对流为驱动力。

本书可供大地构造、构造地质等方向的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大陆壳的演化及其动力学 / 谢鸣谦编著. —北京: 科学出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-03-056140-4

I. ①大… II. ①谢… III. ①地壳-大地演化-研究 ②地壳运动-动力学-研究 IV. ①P541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 317907 号

责任编辑: 刘浩旻 韩 鹏 姜德君 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 450 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

近年来,固体地球科学的研究逐渐为人们所关注,特别是英国地质调查局、瑞士联邦理工学院、德国地球科学研究中心等提出了2013~2033年的欧洲固体地球科学研究计划,涉及范围包括气候变化、自然灾害、风险资源、地球起源和地球动力学等方面。这也是现代地球科学发展的新动向。在地球科学的研究中,人们已经重视地球圈层的分异和相互作用的探究,加强了地球深浅层物质组成和交换的探测,从地球热场和物理场的监控,解析壳幔演化的机理及过程;另外,开拓了地球起源和地球历史变革的研究,特别是推进了大陆壳运动的地球动力学研究。

从固体地球科学研究的视角,笔者认为大陆壳的演化及动力学的研究应该在以下三个方面有所体现:

- (1) 大陆壳物质组成、结构及其形成过程。
- (2) 大陆壳物质的转换及与其有关的热演化。
- (3) 大陆壳演化的驱动机理。

笔者以组成地球最主要元素和最能代表地球深部物质的铁元素的熔融为切入点,确定了地球初始熔融的条件和时期及地球圈层分异的过程。这是大陆壳生成的前兆,也为陆壳生长点的出现准备了条件。笔者根据岩石学 and 同位素年代学的分析,提出了全球陆壳的五个生长点,代表着全球最古老的高级变质地体、绿岩带、斜长岩地块及片麻岩穹窿的存在。大陆壳将由此萌生扩展。然而大陆壳真正的扩展是在其后的陆壳厚度和面积的加积作用,更来自陆壳内部块体的分裂、碰撞和岩浆的添加作用。

据资料显示,在大陆壳的发展过程,从太古代至今共有七个联合大陆生成。意想不到的是,笔者发现,陆壳造山带的进展与联合大陆的开合在时间上有一致性,说明两者都在同一动力条件下运行,这就是热动力机制的作用。热动力通过地幔对流实施对联合大陆和造山的控制,而对流的周期性就决定了联合大陆与造山发展时段的一致。笔者已经推算出其周期为4.5亿年,这符合太古代至今共生成七次联合大陆的事实。

历史时期,联合大陆的有序出现及各自的发展特征,使我们看到了以下三个迹象。

(1) 联合大陆内部,都显现出两个不同的“微板块”组合体,笔者将其看作未来陆壳上南北两个超级大陆的雏形,这意味着现今的劳亚大陆和冈瓦纳大陆在历史时期就已显现。

(2) 与上述组合体有关的是,在各联合大陆内的两大组合体之间都有陆间海槽(或地中海)出现(见第九章),笔者认为这就是古地中海或特提斯海,这就是说,特提斯并不是古生代末至中生代所特有,而是由来已久。因此,人们常说的原特提斯、古特提斯和新特提斯将被历史所淡化。

(3) 随着历史的进展,在后来出现的联合大陆(潘诺西亚联合大陆和盘古联合大陆)内南北超级大陆之间,微板块群十分发育,笔者认为这是两个超级大陆在发展过程中,发

生碰撞、揉搓、摩擦造成超级大陆边缘撕裂、分离，产生大量微板块群，它们经过游离、会聚、拼贴，镶嵌于南北两个超级大陆（或岩石圈板块）之间，形成了全球最大的微板块分布区，成为一独立的构造域，笔者将其称为拼贴板块构造域。它是古生代以来构造发展活跃的地区，也是全球大地构造发展的主旋律所在，对此，笔者给予了较详细的论述。

在地球动力学的讨论中，笔者所持观点与板块学说尚有差异。20 世纪 60 年代板块学说兴起，其倡导者以地幔对流作为板块运动的驱动力而得到地学界的广泛支持，但是笔者认为这种观点是片面的，是不能接受的。笔者和谢鸣一教授曾著文论述过，认为海洋板块和大陆板块的驱动力是不同的，海洋板块的驱动力是来自大洋海岭处上涌岩浆的添加作用，它导致海底的扩张，从而像传送带一样，驮载着海地板块运动；但是大陆板块不同，它的驱动力是来自地幔对流，对此，本书中也有较详细的论述。应指出的是，全球有海洋板块、大陆板块和海陆混合板块，驱动力的不同造成板块运动速度的差异，这也引起历史时期，联合大陆的分离速度大于会聚速度等一系列大地构造问题。

人类是生活在地球上，更确切地说，是生活在陆壳上，陆壳的沉降起伏、温度升降、运动强弱等都与人类的生活息息相关。人们应该关注地壳、研究地壳、爱护地壳，为了人类的未来，也为了自己的未来。

本书承蒙中国科学院地质与地球物理研究所翟明国院士提出很多宝贵意见，其中前寒武纪地质演化和构造岩石方面的意见尤为重要，具有很强的指导性；吉林大学葛肖虹教授从历史变革和更迭所表现出的岩石序列方面提出很多有价值的意见，在此一并表示衷心的感谢。

目 录

前言

第一章 地球早期的热演化与陆壳的形成	1
第一节 初始地球的物质组成	1
第二节 初始地球的热能	2
第三节 地热的演变（由热变冷）	10
第四节 地球的熔融及初始陆壳的形成	13
第二章 初始陆壳的生长点	17
第一节 初始陆壳生长点确定的年代学依据	17
第二节 陆壳生长点分述	18
第三节 全球生长点位置的几何排布及形成机理	30
第三章 大陆壳基底的形成	34
第一节 大陆壳基底的岩类组成	34
第二节 大陆壳基底形成的条件分析	38
第三节 大陆壳基底生成的物源	39
第四节 大陆壳基底的形成模式	44
第四章 地盾区陆壳的生长	46
第一节 大陆壳生长的内涵	46
第二节 大陆壳体积生长的主要时段	47
第三节 地盾区面积的分析	47
第四节 地盾区陆壳厚度的分析	50
第五章 绿岩带	55
第一节 绿岩带的分布	55
第二节 绿岩带的组成	56
第三节 绿岩带的分区层序	56
第四节 绿岩带的形成	60
第六章 片麻岩穹窿	66
第一节 片麻岩穹窿的认识追溯	66
第二节 片麻岩穹窿的分布	66
第三节 片麻岩穹窿的特征综述	70
第四节 片麻岩穹窿的形成	72
第七章 大陆壳的生长	74
第一节 大陆壳的岩类组合	74

第二节 非地盾区与地盾区层位对比	75
第三节 非地盾区陆壳厚度的生长	76
第四节 玄武岩岩浆的热传导与大陆壳的增积	83
第五节 造山褶皱带的发育与大陆壳厚度的生长	85
第八章 造山带的发育与大陆壳面积的增生	90
第一节 造山运动与大陆壳面积增生的相关性	90
第二节 地盾区造山带对地盾区陆壳面积的增生作用	93
第三节 地槽造山对陆台区陆壳面积的增生作用	96
第四节 地槽造山是大陆壳面积增生的主因	98
第九章 北、南超级大陆的形成	100
第一节 北、南超级大陆的组成	100
第二节 历史的联合大陆	101
第三节 大陆的联合与造山运动的统一性	111
第四节 联合大陆的发生与造山运动的旋回性	112
第十章 北、南岩石圈板块间的拼贴板块构造域	115
第一节 特提斯及其历史发展	115
第二节 全球微板块与拼贴板块的构造域的展布	118
第三节 岩石圈板块与拼贴板块构造域	120
第四节 拼贴板块构造域的确立依据	122
第五节 拼贴板块构造域微板块的源区分析	127
第十一章 拼贴板块构造域的形成机理	135
第一节 潘诺西亚和盘古两联合大陆的演化与拼贴板块构造域的形成	135
第二节 拼贴板块构造域形成的力学机制分析	136
第十二章 拼贴板块构造域北区形成前的大地构造格局	140
第一节 古亚洲洋的岩石学及岩石化学分析	141
第二节 古亚洲洋的演变	147
第十三章 拼贴板块构造域北区与中区的对接	150
第一节 拼贴板块构造域北区与中区的对接过程	150
第二节 拼贴板块构造域北区与中区碰撞的古地磁分析	154
第三节 拼贴板块构造域北区与中区对接的总样式	155
第十四章 拼贴板块构造域南区与中区的对接—昆仑碰撞带	156
第一节 昆仑碰撞带的偶弧结构	156
第二节 昆仑碰撞带的双变质带	160
第三节 偶弧与建造	162
第四节 构造发展模式	163
第十五章 拼贴板块构造域北区东部各微板块的分离与聚合	166
第一节 各微板块层系的发育	166

第二节	本区各微板块基底岩系的对比	179
第三节	本区各微板块的分离与聚合	180
第四节	本区各微板块分裂与聚合的总特征	195
第十六章	拼贴板块构造域北区西部各微板块的分离与聚合	199
第一节	拼贴板块构造域中区在西部的组成	199
第二节	准噶尔微板块与塔里木微板块的分离与聚合过程	200
第三节	本区三大微板块的张裂与断陷槽的发育	204
第四节	本区三大微板块的聚合与基底的消融作用	212
第十七章	拼贴板块构造域南区各微板块的分离与聚合	224
第一节	本区各微板块早期的统一与聚合	224
第二节	本区各微板块古生代时期的聚合	226
第三节	晚古生代至中生代—新生代本区各微板块的分离与聚合	228
第四节	拼贴板块构造域南区构造发展的力源分析及时序演变模型——构造 发展的力源分析	235
第十八章	拼贴板块构造域的解体与新特提斯海的生成	238
第一节	蒙古—鄂霍次克海槽和锡霍特—阿林海槽	238
第二节	印度河—雅鲁藏布江海槽	244
第三节	中国的大陆迁移与新特提斯海的形成	245
第四节	拼贴板块构造域的解体与盘古联合大陆的衰亡	246
第十九章	板块运动的驱动力	248
第一节	海底扩张的机理与能量	248
第二节	不同板块的运动速度及其差异的形成	251
第二十章	板块运动的速度与大陆壳发展的关系	258
第一节	海陆板块的组合对板块运动速度的影响	258
第二节	大陆板块的运动与地幔对流的关系	258
第三节	海洋板块和大陆板块运动的相互制约	261
第四节	陆块分离与聚合的速度差异是大地构造运动的常态表现	262
参考文献		264

第一章 地球早期的热演化与陆壳的形成

第一节 初始地球的物质组成

人们很早就对地球早期历史或原始状态产生兴趣，并进行过各种揣测（有 40 多种说法），由于是揣测，其真实性很难评说。笔者出于对地球初始热史探索的需要，择其有关论说，略作介绍。

在对地球起源的论说中，有一类学者，把地球的形成与太阳系联系起来。其中，1644 年笛卡儿（Descartes）认为太阳系（包括太阳、行星和卫星）最初是由宇宙物质组成，并不断进行大（如太阳）小（如行星和卫星）不等的涡流运动，逐渐凝缩而形成地球；18 世纪中晚期，康德（Kant）和拉普拉斯（Laplace）认为太阳系起始于一团气状星云，围绕着一个核心旋转，逐渐加快，最后由外向内多次抛出外围星云，并收缩成太阳系。还有学者，如 1979 年戴文赛认为太阳系是由同一的原始星云形成。这种星云主要是气体和少量固体尘埃。星云一开始就自转，并因自身引力而收缩，形成星云盘。中心部分演化为太阳，边缘部分演化为行星。

另一类学者主张组成地球的原始物质是由太阳分裂而来。但分裂的原因各人看法不同。1745 年布丰（Buffon）认为彗星与太阳碰撞，使太阳物质分裂为碎块，分散于太空，后因吸集作用形成地球和行星；1900 年摩尔顿（Moulton）认为，曾经有一颗恒星运动到离太阳很近时，使太阳的正面和背面产生巨大的潮汐，并抛出大量物质。此物质逐渐聚集，形成了许多固体团块或质点（星子），并进一步聚合成为行星和卫星。

由此可知，不论地球原始组成物质是来自早已存在的宇宙尘埃，或来自太阳的分裂碎片，它们都是气状星云，并不断旋转运动，使轻物质不断抛出，而重物质或土物质被凝缩形成星云盘。由于引力的作用和引力的不稳定性，星云盘内的物质发生碰撞吸集，从而形成许多行星，地球也由此产生。

另外，有人还估计，从星云物质的聚积到地球的形成，需要 1000 万 ~ 1 亿年，而且随着与太阳距离的增大，行星形成的时间越长，可能达数亿年。

从上述地球起源的各种论说，对地球初始状态的描述可以得出：

- （1）地球是一个由初期分散的气状尘埃或质点组成的星云团块。
- （2）星云团块不断进行涡流运动或旋转，使星云团块逐渐收缩，形成星云盘。
- （3）星云盘的运动逐渐加速，产生物质分异，轻物质不断抛出，重物质不断凝聚。
- （4）由于引力的作用，星云盘内物质相互碰撞和添加。

因此可认为，上述初始地球气状物质在不断地旋转运动中相互碰撞、吸集，由分散到凝缩，逐渐形成地球的原始状态。

第二节 初始地球的热能

我们认识地球初始阶段的热能是以该阶段的不同热源开始。人们一般认为在地球最早阶段主要有以下两种热源。

一、碰撞和收缩热能

前已述及，地球最早是由一团气状物质组成。这种气状物质的相互撞击及在太空中的旋转凝缩，可以使机械能充分转换成热能，从而使地球增温变热，产生巨大的热效应。但此热效应有多大，或者说，此热效应会使地球增温到何种程度，应该进一步探讨。

早在 20 世纪 40 年代，霍伊尔 (F. Hoyle) 曾研究过这个问题。他对冷气云的凝固或收缩而形成行星的热能转换过程进行了估算。虽然他计算中的有些问题有待进一步验证 (如对冷气云凝缩时间的设定还需研究等)，但他的计算程序应该给予肯定。他对气云质点的凝缩撞击表述如下。

物质或星体间引力的作用，使所添加的物质以动能 E 撞击一个半径为 s 、质量为 M 的凝缩球面，其动能为

$$E = \kappa \frac{M}{s} dm \quad (1-1)$$

式中， κ 为引力常数； dm 为冲击体的质量。如果使凝缩作用的速度大到在时间 t 之内把“行星”的质量增加一倍的程度，那么每单位时间增加的能量为

$$\dot{E} = \kappa \frac{M}{s} \cdot \frac{M}{t} \quad (1-2)$$

每单位面积所具有的能量为

$$\frac{\dot{E}}{4\pi s^2} = \frac{\kappa M}{s4\pi s^2} \frac{4}{3} \pi \rho s^3 \frac{1}{t} = \kappa \frac{M\rho s}{3t} \quad (1-3)$$

式中， ρ 为“行星”的密度。据推测，行星的表面温度将变为高到使单位时间因辐射而散失于空中的总能量等于由添加质点的轰击而获得的能量。温度 T (K) 时的单位时间和单位面积的能量由斯蒂芬-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律得出：

$$\frac{\dot{E}}{\text{面积}} = \sigma T^4 \quad (1-4)$$

式中， $\sigma = 5.67 \times 10^{-5}$ ，使用厘米-克-秒单位制 (CGS)。使式 (1-3) 和式 (1-4) 的右端相等，就得出

$$\sigma T^4 = \kappa \frac{M\rho}{3t} \quad (1-5)$$

所以

$$T = \left(\frac{\kappa M\rho}{3t\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1-6)$$

因一个行星和地球类似 ($\rho = 5.6 \quad M = 5.98 \times 10^{27}$, 使用厘米-克-秒单位制), 其结果为

$$T = 1.9 \times 10^6 / t^{\frac{1}{4}} \text{K} \tag{1-7}$$

它说明温度 T 对于 t 是灵敏的。Hoyle 选取 $t = 10^5$ 年 ($3.15 \times 10^{12} \text{s}$), 而获得

$$T \cong 1400 \text{K} = 1127^\circ\text{C} \tag{1-8}$$

他所得出的 T 值还是比较高的, 甚至可能熔化地球。但此值是在选取 $t = 10^5$ 年的条件下得出的。此 t 值是否取之有据, 值得商榷。

很明显, 从式 (1-7) 可知, T 随着 t 的延长而减小。选取 $t = 10^5$ 年, 虽然会算得高的地球增温, 但 $t = 10^5$ 年的合理性尚不得而知, 也由此对其计算结果产生疑虑。

其实, 对地球因凝缩碰撞而形成所需的时间, 在 Hoyle 设计方程计算之前的 20 世纪中期 C. E. V. Weizsäcker 就认为, 行星形成的时间为 10^8 年 ($3.15 \times 10^{15} \text{s}$)。虽然现在尚不清楚他提出的 10^8 年的根据, 但以 t 为 10^8 年取代式 (1-3) 中 10^5 年进行计算, 其结果更令人难以接受, 因为得出的 T 值为 250K , 即 -23°C 。此值太低, 这不是增温, 而是在降温。它低于水的结冰温度, 不可能熔化地球。因此 t 为 10^8 年是不能成立的, 也是不能用于计算地球的凝缩能的。

到底 t 值的合理范围如何取值, 笔者作如下考虑。

笔者在论述地球的起源时提出, 在行星由气状星云经凝缩碰撞形成行星的时间为 1000 万 ~ 1 亿年, 而且距太阳越近, 其形成时间越短, 而太阳形成的时间为 10^7 年 (据 Scheidegger 于 1963 年的资料) (也即在其他行星形成之前太阳系就已形成), 因此地球作为离太阳较近的行星 (由近及远排列第三), 也可用 10^7 年作为其形成时间, 应属合理。由此, 将式 (1-3) 中的 t 确定为 10^7 年 ($3.15 \times 10^{14} \text{s}$) 则计算出: $T = 451 \text{K}$, 即 $451 - 273 = 178^\circ\text{C}$ 。此值也不算很高, 但它出之有据, 也算合理, 笔者认为是可信的。

以上是 Hoyle 根据冷气云的凝固或收缩而形成行星 (地球) 的热能转换过程, 进行热量的估算。另外一种对地球初期热能的探究如下。

据美国物理学家组织于 2011 年 7 月的报道, 由日本东北大学中微子科学研究中心等机构组成的国际研究小组利用日本岐阜县地下千米处的 KamLAND 观测装置发现, 地球内部自身的热量约有一半来自放射性物质的衰变, 另一半则是从 46 亿年前地球刚形成时保存至今的原始热量。此成果刊登在英国《自然·地球科学》(2011 年 7 月) 上。

美国也有与此类似的研究成果, 美国能源部劳伦斯伯克利国家实验室的弗里德曼提出, 在地球表面释放的热量中有大约 54% 来自放射性物质衰变, 其余为地球诞生时保存下来的原始热量。

另外, 地质学家根据来自全球 2 万多个钻井的温度测量数据计算出地球散失到太空中的热量约 44 太瓦 (44 万亿瓦特)。地球初期生成的热量约为 21 太瓦, 其余热量来自放射性生成热。

综上所述, 地球的原始热量还是很可观的, 到现在还留有 46 亿年前的地球的“体温” (据 2011 年 7 月的《自然·地球科学》)。另外, 有学者也提出了放射性生成热的问题。

二、放射性元素的生成热

(一) 放射性元素的生成热及生成热量

地球形成初期，在凝缩热能存在的同时还存着放射性元素的生成热。在这以后时期，放射性生成热仍然是地球内部很重要的热能。

1987 年，东京大学的小柴昌俊提出，铀和钍的原子核在被破坏的时候会产生电子和“反电子中微子”。他带领的这支国际研究小组用了 7 年零 8 个月的时间，通过观测到的反电子的数据，于 2009 年计算出地球内部的放射性物质产生的热量为 21 万亿瓦。此值相当于地球地表散发出总热量 44.2 万亿瓦的一半，其余一半被认为是地球诞生时所产生的热量。而且以前的研究人员利用通行的主体硅酸盐地球模型计算出约 8 太瓦（8 万亿瓦特）来自铀（U）-238、8 太瓦（8 万亿瓦特）来自钍（Th）-232、4 太瓦（4 万亿瓦特）来自钾（K）-40。研究人员还计算出铀和钍对地球热量的贡献为 20 太瓦，其余同位素衰变热量为 3 太瓦。共计放射性衰变热量为 23 太瓦（23 万亿瓦）。

各放射性元素在地球内部各壳层的丰度是不同的，因而各壳层的生热量也是不同的，其中以地壳的生热量最大（表 1-1）。另外，各放射性元素的生热率也是不同的，其中以 U-235 生热率最高（表 1-2）。

表 1-1 地球各壳层放射性生成热

壳层	U-235	U-238	Th-232	K40	合计	所占比例/%
地壳	22. 59	535. 55	544. 76	158. 99	126. 89	76. 3
地幔	5. 86	144. 35	168. 61	46. 02	364. 84	21. 7
地核	0. 85	16. 74	14. 64	—	32. 22	2. 0
合计	29. 29	698. 73	728. 02	205. 02	1661. 06	100

注：受四舍五入的影响，表中数据稍有偏差

表 1-2 地热源中放射性元素生热率 [单位：J/(g·a)]

U-235	U-238	Th-232	K40
13. 72	3. 1	0. 84	0. 0000011

综上可知放射性生成热在地球热源中的重要性。但是放射性生成热是随时间变化的。

(二) 放射性生成热的演化

Dickinson、Luth 和 Lambert 曾在 20 世纪后期对放射性元素生成热做过研究，认为自地球生成以来，即从距今约 45 亿年以来，铀、钍、钾在单位时间（年）和单位重量（克）所生的热量在逐渐下降（图 1-1）。另外，他们还还对历史时期早期的铀、钍、钾的生成热与现今的生成热做出相对量的比较，见表 1-3。

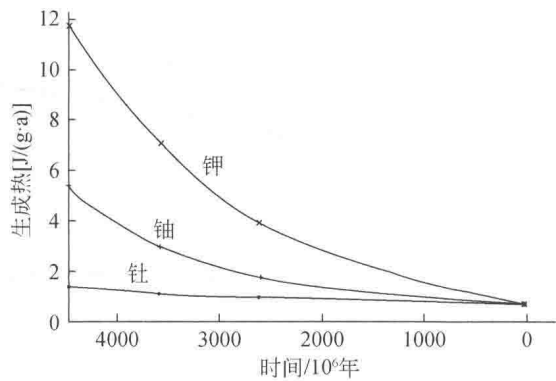


图 1-1 铀、钍、钾生成热随时间的变化（据 Lambert 于 1976 年的资料）

表 1-3 地球形成以来各时期铀、钍、钾生成热的相对量

元素	45 亿年前	36 亿年前	26 亿年前	现代
铀	5.49	3.14	1.98	1
钍	1.25	1.2	1.13	1
钾	11.88	7.24	4.18	1

可以明显看出，三种主要的放射性元素的生成热，晚期比早期大大降低。即使在地球
的同一深度，代表热量的地热梯度，晚期（包括现代）也低于早期（图 1-2）。

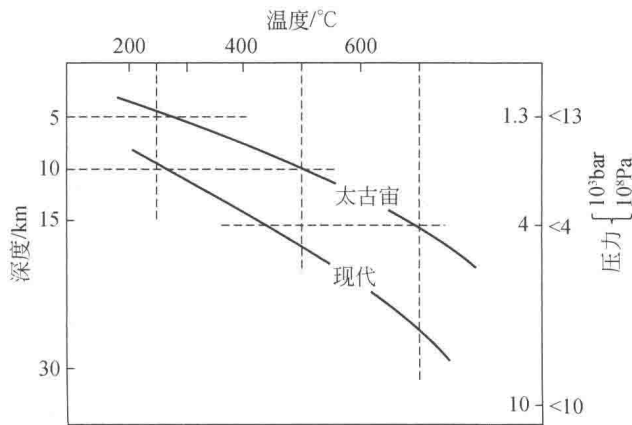


图 1-2 太古宙与现代的地热梯度

1 bar = 10⁵ Pa

放射性生成热变化的直接效应就是地球早期的温度高于现在，地球在由热变冷。
以上是从放射性元素的本身热量的变化来说明放射性生成热演化。以下从放射性元素
的空间展布及迁移来说明放射性生成热演化。1956 年 Jacobs 进行了这方面的工作。他通
过计算认为，在地球内部，放射性元素的分布随着深度的不同而有差异。同时也得出，放
射性生成热与地球的演化相联系，甚至他把放射性生成热作为地球被熔化从而导致地球层
状分宜的热动力源。他将放射性生成热随时间的变化表示于图 1-3 中。

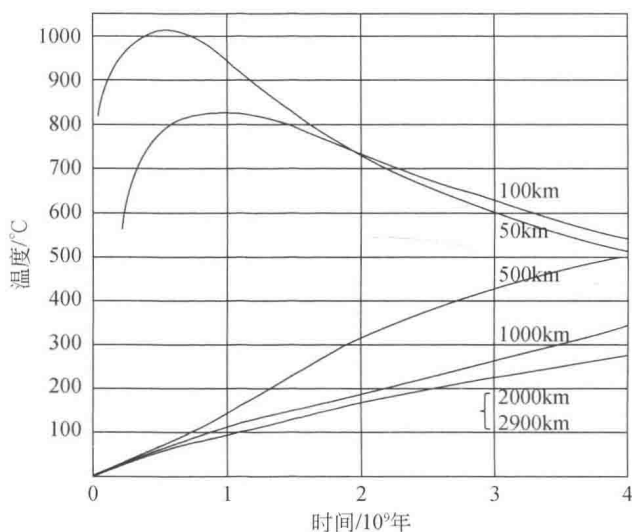


图 1-3 在放射性的地球中不同深度的温度分布（据 Jacobs 于 1956 年的资料）

由图 1-3 可以看出：

(1) 在地球的 500 ~ 100km 深度，随着时间的推移，放射性生成热在减少（温度下降），而在 100km 以上的深度，随着时间的推移，放射性生成热在急剧升高，说明放射性生成热的高值在向浅部移动。

(2) 在距今约 10 亿年时，于地球 100km 深处，有一放射性生成热的最高值，达到约 830℃，而在距今约 2.5 亿年时，于 50km 深处，有一放射性生成热的最高值，达到约 1100℃。而在距今约 0.5 亿年时，又降至约 820℃（可能还会低）。说明：①从距今约 10 亿年开始，于 100km 的深处，地热大量散失，地温降低；②从距今约 5 亿年开始，于 50km 的深处，地热大量散失，地温急剧下降。

对此，可以解释为，从距今约 10 亿年至 5 亿年及其以后，从地球 100km 深处向上至 50km 甚至更浅，地热急剧逸散，地温迅速降低。说明这一时期是地质事件的频发期，也是地球演化的大转折时期。这是值得关注的问题。

为了更清楚和更明确地表示 Jacobs 提出的地球放射性生成热随时间的变化，笔者据其资料用另一种形式表示，如图 1-4 所示。

由图 1-4 可以看出：

(1) 放射性元素在地球气状星云凝缩之前就已分散于全球，而在地球形成的初始阶段，即大约距今 40 亿年期间，就显示出在地球的浅部 1000km 以上（其实应在 750km 以上，依据见本章第三节）放射性元素有富集现象，使该区增热明显高于其深部。此与克拉克和林伍德于 1964 年所认为的放射性元素主要分布于上地幔数百千米处的观点相一致。而且随着时间的推移，在地壳深部花岗岩的侵位所引起的粒变岩相变质作用会使铀、钍、钾向地壳浅部迁移，造成放射性元素更向浅部富集的趋势，使放射性生成热越向浅部增热越快，而向深部增热减少。

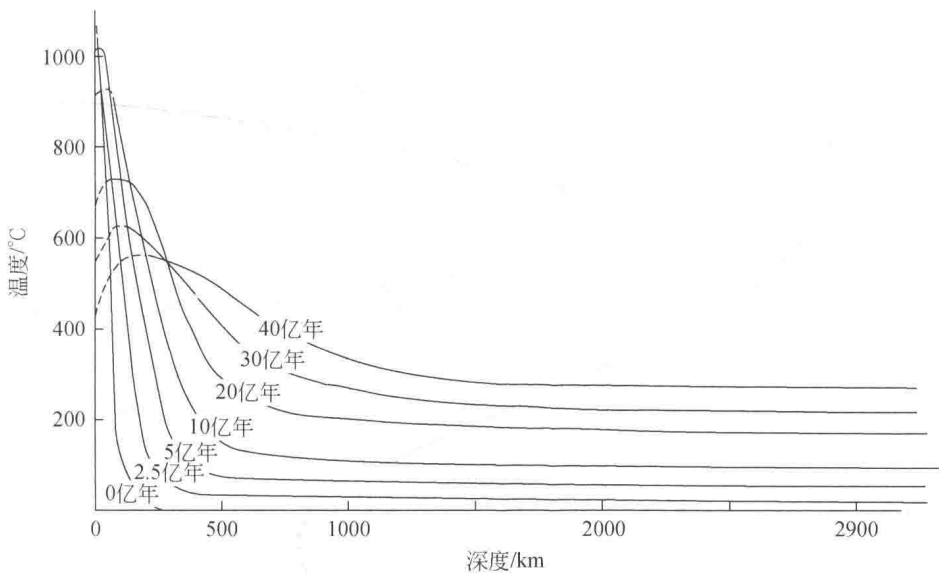


图 1-4 地球不同深度放射性生成热随时间的变化

(2) 在图 1-5 所表示的热史演变中，放射性元素的增温不断有高值即峰值出现。从 40 亿年至 10 亿年（甚至更晚），各时期的峰值深度越来越浅，由 200km 上移至 50km；而峰值的温度越来越高，由 560℃ 上升至 930℃，见表 1-4 和图 1-5。

表 1-4 不同时期放射性生成热和峰值温度与时间、深度对应关系

时期/亿年	深度/km	峰值温度/℃
40	200	560
30	150	630
20	100	730
10	50	930

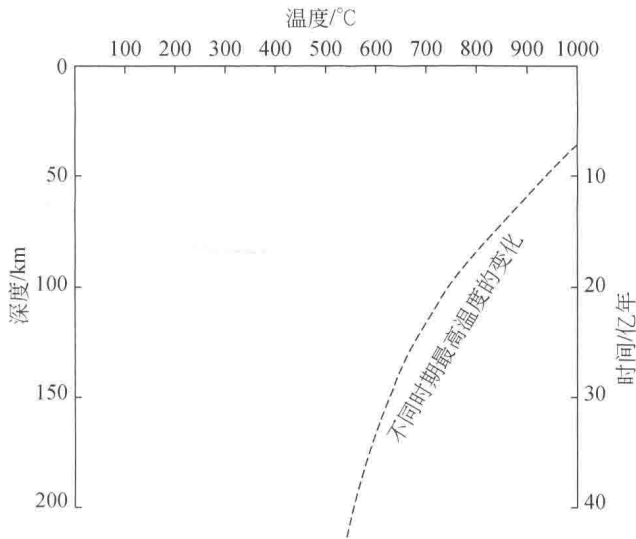


图 1-5 不同时期放射性生成热的高温值随时间和深度的变化

以上表述说明放射性元素及其生成热由地球深部向浅部迁移的事实。

应指出的是，Jacobs 所提出的放射性生成热是以所设定的地球冷却的 0℃ 开始的，这不符合事实。因为在放射性热出现的时期，地球的凝缩热就已存在。也就是说放射性生成热并不是在地球冷却到 0℃ 的状态下出现的。当地球还处在气状星云阶段时，放射性元素就已分散于全球，因而在全球就已生热。甚至可以说，放射性元素在地球早期生热量最大（图 1-1）。Jacobs 置这一阶段放射性生成热于不顾，而以地球 0℃ 为起点讨论放射性生成热，显然是不全面的。由此，对地球早期放射性生成热情况及地球演变中放射性生成热有进一步阐述的必要。下面就来论述这一问题。

1941 年，L. B. Slichter 提出，地球内部的热源主要来自于放射性元素生成热。并以放射性物质的衰变常数为依据来推算地球生成以来放射性生成热的变化。他提出解傅里叶的热传导方程式（在球面坐标系中）来解决这一问题。因为此方程是以热演化为根据的。

$$\rho C = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(K r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + H(r, t) \tag{1-9}$$

式中， $H(r, t)$ 为单位时间内单位体积的放射性生成热的速率； C 为比热容； K 为热传导系数； T 为温度。他认为，解此方程比较困难，只能用高速率的计算机做计算试验。

后来（十几年后），L. C. Allan 用两个设想的特殊模型进行了这项计算，其结果见表 1-5。

表 1-5 在 Allan 模型中的温度

模型	时间/亿年	温度/℃					
		50km	100km	500km	1000km	2000km	2900km
模型 I	0	666	1220	2310	2856	3615	3958
	2.5	905	1216	2339	2894	3656	3992
	5	861	1166	2361	2930	3693	4024
	10	763	1056	2382	2988	3753	4077
	20	606	892	2358	3072	3844	4162
	30	521	785	2308	3124	3913	4225
	40	461	714	2248	3163	3970	4282
模型 II	0	666	1220	2310	3856	3615	3958
	2.5	1447	1520	2330	2885	3643	3985
	5	1424	1576	2346	2910	3667	4010
	10	1267	1481	2369	2960	3705	4052
	20	997	1245	2383	3017	3763	4117
	30	825	1073	2347	3057	3808	4168
	40	712	934	2298	3086	3841	4209

为了直观地看出历史时期地球内部温度的变化，笔者依据表 1-5 的数据绘出随着时间地球不同深度的温度变化图（图 1-6）。

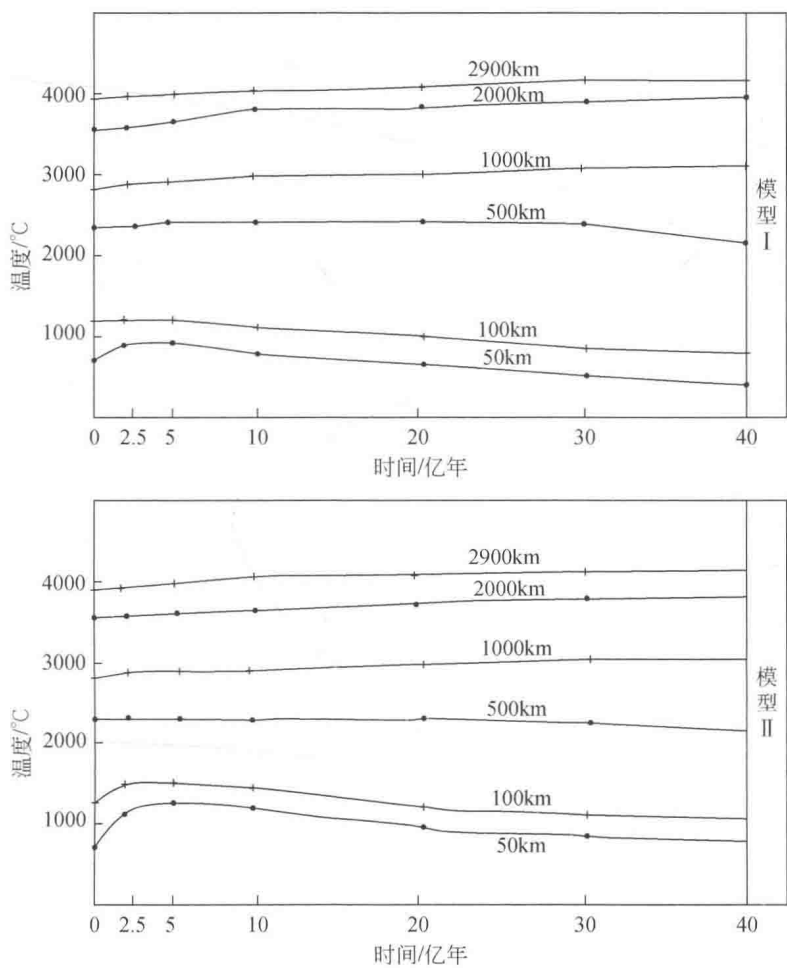


图 1-6 地球不同深度的温度随时间的变化

从图 1-6 的模型 II 中可以看出：

在地球界面 500km 以上（实际应在 410km 以上，理由见本章第三节），从距今 40 亿年至 2.5 亿年，温度一直在上升；而在地球界面 1000km 以下，从距今约 40 亿年至现今，温度一直在下降。

还应指出的是，在 100km 以上，于 10 亿年至 5 亿年间（晚元古代以后），温度上升最快，其后又突然下降。此与 Jacobs（图 1-1）的 10 亿年以后在地球浅部（100km 以上）的温度变化类似。说明在地史发展的晚期，于地球浅部出现的增温和降温的确切性。

（1）地球浅部的增温，是放射性物质的生成热所致；地球深部的降温，一是由于放射性元素向浅部迁移，二是该区地球原始生成热（如凝缩能的转换）和早期放射性生成热逐渐散失造成，但总体上说，地球的生热率在下降。因此地球总热在降低（图 1-1）。

（2）地球浅部 5 亿年以后的突然降温，可能是由于深大断裂（岩石圈断裂）断穿该区，开启了地热向地表逸散的通道，或由于该区岩浆大规模的熔融，形成大规模的岩浆上涌，地热外溢。还有可能是由于全球冰期的出现。这些地质事件会在以后陆续得到论证。