



地球的理论

〔美〕D.L. 安德森 著

地震出版社



地 球 的 理 论

[美] D.L.安德森 著

关华平 杨玉荣 刘小伟 等 译

周蕙兰 魏东平 金 文 校

地 震 出 版 社

1 9 9 3

(京) 新登字 095 号

内 容 提 要

本书是地球科学理论发展 200 多年来又一部重要专著。当代地球科学吸取了多种学科最新成果,取得了很大的进展。作者利用天文学、地质学、岩石学、地震学、固体地球物理及地球化学等多种知识,讨论了地球的起源、成分和演化问题,介绍了地壳、上地幔、下地幔和地核特性,还对地球的热力学性质、弹性、非弹性、粘弹性、非均匀性(各向异性)以及化学组成、同位素等进行了专门的研究。本书适合于地球物理、地质、天体物理工作者及有关大专院校师生使用。

Theory of the Earth

Don. L. Anderson

Blackwell Scientific Publications

地球的理论

[美] D.L. 安德森著

关华平 杨玉荣 刘小伟等译

周蕙兰 魏东平 金 文 校

责任编辑: 姚家榴

版式设计: 王花芝

*

地质出版社 出版

北京民族学院南路 9 号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 30.75 印张 784 千字

1993 年 12 月第一版 1993 年 12 月第一次印刷

印数 001—900

ISBN 7-5028-0921-X / P · 573

(1314) 定价: 22.50 元

在经历了漫长的岁月后，人们才开始懂得，关于地球的任何可靠的理论必须依赖于地球自身提供的证据，在没有收集到大量证据之前，要想正确建立这样一种理论是不可能的。

SIR ARCHIBALD GEIKIE

1905

前 言

地球科学的发展产生了彼此不尽相同的分支学科，例如：地质学、岩石学、矿物学、地球化学、大地测量学和地震学。这些分支学科甚至又可分为更细的单元。地球科学已扩展到了包括行星、甚至宇宙的范畴。在各个领域从事研究的人员倾向于以完全不同的方法来研究地球。某一领域的发现也只是缓慢地渗透到其它领域专家的意识中。尽管事实上只有一个地球，但有关地球的理论可能比天文学、粒子物理学或细胞生物学的理论还要多，而在这几个学科中，每个被研究的客体却都有无数的样本。至于各分支学科之间的交叉学科，更是五花八门。一个分支学科的未被证实的假定或定理，常常被一个稍微交叉领域的理论家看作是严格的边界条件。各分支学科的资料一般与一系列假定是一致的。随着越来越多的各种各样的资料被用来解决一个特定问题，可能的解答范围也就大大缩小了。关于地球起源、成分和演化的问题，至少需要有关天文学、宇宙化学、气象学、行星学、地质学、岩石学、矿物学、结晶学、材料科学和地震学等方面的知识。对一个地球科学的学生来说，这样的学科划分虽然是人为的，但是要想在一个特定的前沿领域取得成就，这样的划分又是必须的。

这类例子是极其丰富的。在探索各种构造区域下面的或深部俯冲板片附近的波速异常的意义时，地震学者通常用均匀各向同性的半无限空间或连续分层介质中的温度变化来解释地震结果，但岩石学方面——矿物学、结晶取向或部分熔融含量的变化——却更为重要。而这些本身又需要相平衡和材料性质方面的知识。

一个同位素地球化学家，在发现岩石中几个古孤立储层的证据时，在普遍察觉地壳和650km间断面地球物理证据时，往往按照地壳混杂或旋回，“正常”地幔源头和下地幔源头来解释化学资料。“标准”的岩石学模型是个均质橄榄岩地幔，其中包含大约20%的玄武岩，这些玄武岩刚好能够向大洋中脊供给均匀的岩浆。通常认为，外来的玄武岩来自于核幔边界，并且也与地壳发生相互作用。地壳和浅部地幔也许是非均匀的，但地幔的其余部分由于对流被认为是非常均匀的。

对流理论家将地幔处理成单层均匀流体或双层流体系统。这样的系统具有恒定不变的物理性质，并由温度导致浮力驱动，而同时忽略了熔化和相变以至压力。

在《地球的理论》中，我试图收集能够了解地球各有关分支学的点点滴滴。岩石和岩浆是我们获取关于地球内部信息的最为直接的来源，但同时也使我们对地壳和浅部地幔的了解存有偏差。地震学是我们获得地球内部深处信息的最好的来源，可是解释地震资料中包含的地球结构等方面的信息时，需要有固体物理和实验岩石学的背景知识。虽然这并不是一本有关地震学的书，但却以各种方式用到了地震学的知识。

这里所展示的“地球的理论”在许多方面与通常的观点不同。岩石学家的地球内部模型一般将注意力集中在地幔物质的组成上，来源于地幔的物质标本包含玄武岩和金伯利岩，这样便得到一个“最简单”的假定：玄武岩和橄榄岩具有互补的关系，橄榄岩来源于玄武岩或曰橄榄岩是玄武岩移走后的残余物，并且全地幔的化学成分与上地幔及玄武岩源区是相

同的。因此即是说，地幔在成分上是均匀的，由此得到所有的地幔物质最终上升到地表而提供玄武岩。已消减的板片可以不受阻碍地通过地幔一直下沉到核幔边界。

地球化学家们通常将上地幔作为洋中脊玄武岩而将下地幔作为热点、热柱（涌流）或洋岛玄武岩，来识别各种不同的储层或源区。在某些模型中，地幔仍然大体上是均匀的，但包含各向同性的不同同位素物质的斑点，此时的地幔类似于一个大理岩结块。

而地震学家们则认为，在上地幔中存在很大的横向不均匀性及几个主要的地震不连续面。在均匀地幔模型中，这些不连续代表平衡相变，部分原因可能是化学变化。海洋和大陆岩石层或高速层，其物质或许与其下面的地幔物质不同。

利用目前的资料外推地球遥远的过去是困难的。“现在是过去的钥匙”，地球科学家们很自然地认为，地球自始至终总是基本不变的。如果地幔现在是均匀的话，那么它过去一直如此。与这种观点稍有不同，我们现在认为，地壳是由上地幔在地球的早期形成的，下地幔则仍然为“原始的”或非分异的，并且一直如此。

但是，如果考虑地球起源的环境，人们就会提出一个不同的“最简单的”假说。外加的能量很大，生成物的熔融温度和密度彼此非常不同，以致产生化学分层。于是玄武岩及其它不相容成分向地面集积，同时致密的耐熔结晶体则向内部运移。所有这些形形色色的假说都可以用现代资料来检验，只有使用种类广泛的资料，才可能约束这许多的可能性。

这本书的书名并不是偶然想到的。今年是现代地质学的缔造者 James Hutton 的《地球的理论——苏格兰圆丘地区的成分、溶洞的观测调查，以及全球土地资源》一书发表 200 周年纪念。在其它自然科学尚未取得重大进展时，地质学已具有牢固的基础或具有真正的科学地位。Hutton 不但深刻地了解化学和矿物学方面的知识，而且他的观察和概括能力也是非凡的；只是由于其它基础科学的不成熟，才使他的《地球的理论——……》一书显得并不完善。到了本世纪，地质学不但吸收了其它诸如物理学、化学、生物学方面的知识内容，同时也将地球物理学和地球化学作为新的工具，这就使得现代地质学变得连 Hutton 这样的地质学创始人也会不尽理解，尽管现代地质学仍然遵循 Hutton 最初的目标。Hutton 的均变原则需要极其漫长的时间来完成他所描述的地球表面的形成过程，并且他也知道，不同的岩石通过不同的过程而形成。我们现在则认为：这样的一些过程包括一些灾变性的事件，但 Hutton 提出的这些概念仍然是正确的，他的理论在当时颇为流行，这一理论认为，岩石是由海洋中的矿物沉积而成的。具有讽刺意味的是，海洋中巨大的岩浆的晶体化这一重要的过程在时间上早于可见的地质学记录，而均变学说显然不可能对此解释过多。

“理论”一词有两层含义。一种理论是指导人们研究特定领域内的事实、原理和假设。物理学、化学、生物学以及天文物理学与地质学一样，都有自己一套完善的理论，这些理论今日都已渗透到了地球科学之中。地球学科的学生必须了解固体物理学、结晶学、热力学、胡克定律、光学等等。但是，这些理论加在一起并不等于“地球的理论”，它们只是我们用以解开地球之谜的工具，并提供一些基本事实，而这些则是了解地球是如何动作的一些线索。这些线索可望对我们了解行星的起源、结构、组成和演变有所帮助，这也是我们改进 Hutton 《地球的理论——……》一书的初衷。

致谢(略)

目 录

第一章 类地行星	关华平译、周蕙兰校 (1)
行星形成的理论	(1)
陨石	(5)
行星的大气圈	(11)
类地行星的成分	(14)
比较行星学	(32)
第二章 地球和月球	刘小伟译、魏东平校 (35)
地球的基本成分	(35)
地球内部的演化	(37)
地壳的起源	(40)
地幔和地核的起源	(41)
地幔矿物成分	(44)
月球	(47)
第三章 地壳和上地幔	张宇霞、孙洪先译、金文校 (58)
地壳	(58)
地震岩石圈(LID)	(63)
低速带(LVZ)	(67)
50 到 400km 深度的矿物学模型	(72)
过渡区	(73)
第四章 下地幔和地核	刘小伟译、周蕙兰校 (80)
下地幔的成分	(80)
D'' 区域	(84)
地核	(85)
地幔-地核的平衡	(93)
磁场	(95)
第五章 热力学与状态方程	姚家榴译、周蕙兰校 (102)
热力学	(102)
理论状态方程	(108)
Grüneisen 关系式	(109)
体积模量的温度效应	(112)
热膨胀和非简谐性	(114)
等温-绝热变换	(118)
地球密度的计算	(119)
有限应变状态方程	(120)

下地幔地震特性的零压值	(122)
状态方程	(123)
地震参数 Φ	(127)
组成和相态的效应	(129)
排斥势	(131)
冲击波	(135)
第六章 弹性和固态地球物理	姚家榴译、周蕙兰校 (139)
各向同性固体的弹性常数	(139)
弹性模量对温度和压力的导数	(143)
内禀和外赋温度效应	(145)
对下地幔热力学的地震波约束条件	(148)
弹性性质的温度校正	(164)
复合物的弹性性质	(165)
液体	(166)
第七章 非弹性和传热性质	吕广廷、李淑兰译、魏东平校 (176)
热导率	(176)
扩散和粘滞性	(180)
同源温度	(185)
位错	(185)
位错蠕变	(186)
岩石层	(189)
岩石层的有效弹性厚度	(191)
熔融和岩浆源	(192)
离子半径	(194)
第八章 地幔化学组分	杨玉荣译、金文校 (199)
估价地幔化学成分的方法	(199)
上地幔	(208)
下地幔	(211)
岩浆	(212)
大洋中脊玄武岩(MORB)	(213)
热点	(215)
碱性玄武岩	(225)
大陆洪积玄武岩	(227)
安山岩	(229)
陆缘盆地	(231)
科马提岩	(234)
结论	(235)
第九章 源区	关华平译、金文校 (239)
背景	(239)

超镁质岩石	(241)
玄武橄榄岩	(246)
榴辉岩	(247)
Piclogite	(250)
地幔储存体的深度	(252)
地幔交代变质和富集储存体	(255)
深部底辟体的上升	(256)
痕量元素模拟	(258)
第十章 同位素	杨玉荣译、金文校 (262)
铅同位素	(264)
锶和铷同位素	(267)
铅的伴谬	(268)
地幔的同位素演化	(270)
氧同位素	(272)
稀有气体	(274)
岩浆成因的同位素约束	(279)
地幔中岩浆成因和演化模型	(284)
第十一章 地幔的演化	关华平译、魏东平校 (289)
地幔岩石的成因模式	(290)
地幔的岩石演化	(295)
地幔的化学分层	(301)
富集和消耗作用过程的本质	(305)
岩浆混合的作用	(309)
来自富集层中的熔融物质	(314)
岩浆洋	(315)
地幔演化的制约因素综述	(318)
第十二章 地球的形状、热流与对流	汪晓东、韩凤银译、魏东平校 (321)
地形	(321)
大地水准面	(323)
热流	(332)
地球的旋转和极移	(335)
对流	(339)
地球的冷却	(344)
第十三章 地幔的非均匀性	郑斯华译、魏东平校 (348)
由面波速度得到的上地幔非均匀性	(348)
全球面波层析成像	(349)
区域性反演结果	(352)
球谐反演的结果	(354)
热流和大地水准面的关系	(360)

方位各向异性	(362)
由体波得出的横向不均匀性	(363)
下地幔的体波层析成像	(366)
第十四章 粘弹性	高原译、魏东平校 (371)
地震波衰减	(371)
受激过程	(377)
位错衰减	(381)
部分熔融	(387)
体积衰减	(388)
相变系统的弛豫	(391)
液体中衰减的物理过程	(391)
地球吸收带 Q 模型	(394)
第十五章 各向异性	吕广廷译、周蕙兰校 (403)
引言	(403)
地幔各向异性的起源	(405)
晶体中的各向异性	(408)
各向异性的理论	(411)
上地幔中的横向各向同性	(421)
层状介质的横向各向同性	(425)
定向裂隙对地震波速度的影响	(426)
对上地幔的反演结果	(427)
以深度为变量的全球横向各向同性图像	(429)
与年代有关的横向各向同性	(432)
方位各向异性	(436)
剪切波分裂和板片各向异性	(438)
偏微商	(440)
第十六章 相变与地幔矿物学	吕广廷译、周蕙兰校 (447)
球状离子和晶体结构	(447)
地幔中的矿物和相	(454)
地幔系统中的相平衡	(455)
相态关系的计算	(460)
等压相变和物理性质的横向变化	(461)
板片	(463)
附录	关华平译、周蕙兰校 (473)

第一章 类地行星

我想知道上帝如何创造这个世界。我对这种或那种现象、这种或那种元素的光谱不感兴趣。我只想知道上帝的思想，其余的都是小事。

——Einstein

地球是太阳系的一部分。虽然它是研究得最多的行星，但是人们不可能孤立地彻底了解地球。陨石和太阳的化学成分为地球的基本成分提出了约束。其它行星的性质为行星形成和演化的理论提供了想法和理论检验。在研究地球起源和结构的努力中，人们可采取地心方法或采取从头开始的方法（*ab initio approach*）。在地心方法中，人们在时间上倒退往前来描述地球并着手研究它。对于从头开始的方法，人们试图通过崩坍、冷却、凝结和吸积追踪太阳星云的演化，并希望最终得到与地球和其它行星类似的某些东西。在第一章，我阐述一些对了解地球可能有用的外部证据。在第二章，我叙述地球和月球。

行星形成的理论

太阳星云的性质和演化以及行星的形成，是个复杂而困难的课题。事实上确实形成了类地行星的现实，有充分的动力使少数分散的科学家致力于这项研究。有几种可能的行星生长机制。行星不是在某一时段由小的物体（星子）堆集而成，就是这些物体的散布的团群——云团，因重力不稳定而崩坍形成行星尺度的物体。行星或原始行星核，可在无气体的环境中形成；或在存在大量气体的环境中形成，但这些气体随后逃逸了。

现在通常认为行星起源于一团缓慢旋转的具有太阳组分的盘状气体和尘埃——“太阳星云”。富含氢的盘的温度和压力，从盘心沿径向逐渐降低，且从其盘面向外逐渐降低。圆盘由于热辐射而冷却，热量主要沿垂直盘面的方向辐射出去，部分炽热的气体凝结成固态“尘埃”颗粒。随着颗粒的增大，它们通过与其它轨道上颗粒的碰撞过程，通过粘性气体的拖曳和圆盘的重力吸引，而沉积到中央平面上。地球轨道附近的总压力的量级可能为 10^{-3} 到 10^{-4} bar。平面内的颗粒或许形成环带和间隙。沉积速度相当快，但是小物体聚集成行星大小物体的有关过程和时间尺度还不清楚。所有天体演化理论共同思路是，行星由弥散的物质，也即原始行星云而形成。彗星、一些陨石和一些小卫星，可能是从早期堆积阶段遗留下来的。

下列观测结果是对行星起源理论的主要约束：

1. 行星轨道接近于圆形，它们实际上位于单一平面内，其旋转方向与太阳旋转一样。太阳的赤道面接近于轨道面。行星具有旋转选择定向性。
2. 行星距离的分布是规则的（Bode 定律）。
3. 行星成分的分组与距太阳的距离有关。内行星或类地行星（水星、金星、地球和火星）体积小而密度高，旋转慢而几乎没有卫星。常常把月球划为类地行星。巨行星（木

星、土星、天王星和海王星) 体积大而密度低, 旋转快并有若干个卫星。虽然太阳占整个太阳系质量的 99% 以上, 但行星的角动量却占了 98% 以上。

除了吸积机制和行星与太阳物质分离机制外, 还有几个尚未解决的重要问题。

原始行星星云的密度有多大? 用行星现有质量再加上达到太阳组分所必要的轻元素量值, 可求出其下限, 大约为太阳质量的 10^{-2} 。处在重力收缩初始阶段的幼星排挤出的大量物质, 可能占此幼星质量的百分之几十。因此有些理论假设初期质量很大的星云, 其质量可能等于太阳质量的两倍。例如, T-Tauri 星在 10^5 至 10^6 年内, 每年喷发大约相当太阳质量 10^{-6} 的物质。

冷却过程的时间尺度是多少? 尘埃与气体分离的时间尺度是多少? 小行星尺度的物体的增长以及行星由数米增长到千米量级需多少时间? 如果冷却与其它过程相比很慢, 那么行星可以在冷却期间增长并且会是不均匀形成。如果冷却很快, 那么行星可以由冷物质构成, 并以较均匀的物质而逐渐增大。

冷凝期间吸积或非均匀吸积的假说将产生径向分带的含有耐熔物质和富含铁的核的行星, 其成分分带远离太阳。外行星可能是含有丰富的更易挥发的物质。叠加在这种效应之上的是尺度效应, 具有比较大的重力横剖面的更大的行星聚集多数后期冷凝(挥发)物质。

Safronov (1972) 的天体演化理论是目前最广泛流传的理论。该理论假设太阳初期为一均匀气体-尘埃星云, 该星云演化成一圆环, 然后演化成盘形。具有不同偏心度和倾角的颗粒相互碰撞并沉降在少数几个轨道内的中位面上。随着圆盘越来越致密, 它变得很不稳定, 最后分裂成许多块致密的聚集体, 其本身的重力超过太阳的潮汐爆裂力。当尘埃从星云脱离后, 星云的透明度增加了, 而在星云内部产生很大的温度梯度。

使许多颗粒聚集在一起而形成很大行星的机制是很难理解的。具有相当大重力场的很大的星体可以吸引和俘获许多微星。以高速碰撞的小颗粒会崩裂, 并且它们重力横剖面很小, 以致于只能吸引附近的微粒。以最小相对速度共转的微粒所形成的聚集体好象是必要条件。聚集体的自身引力可把许多微粒汇集在一起。很小的物体也可起到凝结核的作用, 而因此增加的物质可直接来自气态。在 Safronov 的理论中, 认为地球物质的 97—98% 是在大约 10^8 年中积累起来的。在其它理论中, 吸积时间短得多, 为 10^5 — 10^6 年。

如果星子之间的相对速度太高, 那么分离将比积聚更占主宰, 而行星将不再增长。如果星子之间的相对速度太低, 那么星子将位于大致同心的轨道上, 行星增长所需的碰撞将不再发生。Safronov (1972) 证明, 在考虑到碰撞中能量损失和物体尺度分布的一些似乎合理的假设之下, 星子间的相互引力将使相对平均速度仅略小于较大物体的逃逸速度。这样, 在行星整个成长过程中, 系统更新其自身, 以致较大的物体总是不断增大。

行星形成的初期是在冷却星云中的冷凝。首批固体在温度 1750—1600K 范围内形成, 它们是钙和铝的氧化物, 硅酸盐和钛酸盐(例如 Al_2O_3 , CaTiO_3 , $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) 以及象铂族那样的耐熔金属。在某些陨石的白色包体(球粒)中, 例如在最著名的 III 型碳质球粒陨石中, 发现了这些矿物(象刚玉、钙钛矿, 黄长石等)和元素。在镁橄榄石和顽辉石类硅酸盐物质大量凝结后不久, 金属铁在很高的温度下凝结, FeS 和含水矿物仅在小于 700K 的很低温度下出现。富含挥发性物质的碳质球粒陨石的形成温度在 300—400K 范围内, 因而至少部分地球必须由此低温下冷凝的物质吸积而成。由于在地球上存在 CO_2 和

H₂O, 使一些人认为地球完全由冷的碳质球粒物质所形成, 即冷吸积假说。Turekian 和 Clark (1969) 假设, 丰富的挥发性物质在晚期进入, 形成一盖层, 这就是非均匀吸积假说。与冷却和冷凝时间相比, 即使地球吸积很慢, 吸积后期阶段也可能含有这样的物质, 它们在星云中进一步凝析出来, 并在后来被摄动进入内太阳系。地球和月球不仅缺乏组成太阳和外行星的高挥发性元素, 而且也缺乏中等挥发性的元素, 象硫、钾、铷和铅。

当微粒落到正在增长的地球时, 释放大量的位能, 足以使温度升高数万度, 从而足以使地球像它形成那样快速地蒸发入太空。有一些机制能缓冲温度的增高, 即使存在蒸发, 也仍保留地球物质; 但是, 一旦原生地球已达到给定的大小, 即相当于月球的体积, 很可能熔化和蒸发。吸积机制和吸积的时间尺度决定了保存下来的热所占的比率, 因此也决定了增长中的地球的温度和含热量。即使地球由冷却的星子形成, 它初期温度可能已经是很高的。快速增长的地球保留吸积时的大部分位能, 尤其如果存在很大的撞击时, 可把大部分位能隐藏起来。关于月球和各种陨石母体那样小星体在早期广泛熔化的证据, 证实了初期高温的重要性, 以及地球的吸积能比月球的高 15 倍以上。固体行星剧烈起伏的环形山状的表面, 为晚期高能撞击的重要性提供了丰富证据。

行星内初始温度可利用在吸积期间达到的能量守恒方程计算出来。

$$\rho \frac{GM(r)}{r} dr = \epsilon \sigma [T^4(r) - T_b^4] dt + \rho C_p [T(r) - T_b] dt$$

式中 t 是时间, ρ 是吸积微粒的密度, G 是引力常数, $M(r)$ 是半径为 r 的增长行星的质量, σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, ϵ 是热辐射率, C_p 是比热, T 是在半径 r 处的温度, T_b 是黑体辐射温度。该方程给出了吸积位能、辐射到太空的能量和物体加热所产生的热能之间的平衡关系。当表面温度达到足够高时, 也包括与熔化和蒸发有关的潜热。增长物体辐射部分吸积能量的能力, 取决于有多少新来的物质保留在物体表面附近, 以及该物质被覆盖或掩埋的速度有多快。撞击物体不可能保留住其所有热量, 因为热要传递给行星物质, 而且投射碎片和目标碎片两者都被抛进大气层很大距离, 在飞越过程中冷却, 而后散布在行星表面上。一部分投射物和喷出物被掩埋起来, 当然在其热量辐射回宇宙空间之前, 它们必定将其热量传给行星表面。后来撞击的翻腾作用也可能把掩埋的热物质翻到行星表面。可以预计, 伴随撞击而产生的脱去挥发成份作用和生热作用产生一热的致密大气层, 它起到保持行星表面的高温和捕获太阳辐射热的作用。

从直观上人们会预计, 吸积的初期阶段很慢, 因为重力横剖面很小且缺少大气; 同时, 吸积的结尾阶段也很慢, 因为微粒已经耗尽。具有此种特征的吸积速率的通用表达式 (Hanks and Anderson, 1969) 为:

$$\frac{dr}{dt} = k_1 t^2 \sin k_2 t$$

式中的 k_1 和 k_2 可以进行挑选, 以求出特定的最终半径和吸积时间。由这种增长定律得到的温度剖面给出一中心冷、中等深度上温度最高和外层冷的行星。叠加于此之上的是一随深度而增加的温度, 它起因于自身压缩和早期吸积微粒的温度可能较高。然而, 后期巨大的撞击, 即使不经常发生, 也能加热而使上地幔熔化。

有一种极限情况是, 在吸积的每一个阶段, 地球表面的温度达到这样的程度, 它按尘粒自由落到地球表面所释放位能的精确速率将能量辐射给尘埃云。假定均匀吸积时间扩展

到 10^6 年，那么最高的温度是 1000K。对于此种类型的模型，要产生高温就要求吸积时间短。但是，地球不可能在辐射平衡中增长。如果地球积累部分地是通过连续捕获流星体的子星群而完成，那么地球内部可达到比较高的温度。这些流星体以比自由落体高得多的速度撞击地球，并通过地震波在被撞击物体深部生热。

现代的吸积计算考虑了在撞击期间能量的分配，其结果为上地幔温度在大部分吸积时间中超过熔融温度（图 1-1）。如果熔融太强烈，熔融体就向表面移动，一部分到达表面并把它的热量辐射出去。但是，热大气层、热学边界层和在地球表面存在化学上的易浮物质，把地球内部的大部分隔绝起来，因而冷却很慢。上地幔的急剧冷却只可能发生在表面冷物质俯冲入地幔中的时候。这就要求一不稳定的表层，也就是很冷的热学厚边界层，它比它下面的地幔致密。在吸积期间，玄武岩或橄榄石在地球表面附近大范围积累，形成了一个阻挡俯冲的易浮层。因此，在成长期间，很可能上地幔是完全熔融的。当厚玄武岩地壳冷却时，其下部实际上转换成致密的榴辉岩。而在此处，部分上地幔可能迅速冷却。浓密的原始大气圈也起到有效的隔热作用。防止地壳和上地幔快速冷却和结晶。

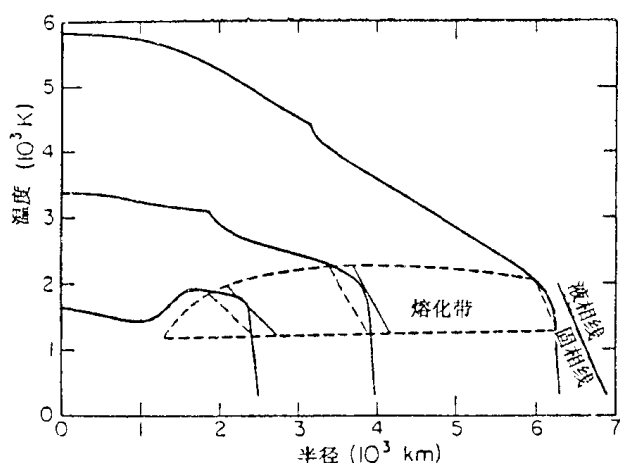


图 1-1 在行星吸积的三个阶段，温度与半径的关系（粗线）。行星内部的初始温度是很低的，因为吸积的能量很低。图中也表示出了上地幔中的固态、液态和熔融带。上地幔的熔融和熔体—固体分离，可能发生在大部分吸积过程。在不相容元素中富化的硅酸盐熔融体将在整个吸积过程中向表面集中。温度计算结果由 D.Stevenson 提供（私人通信）

纵观所有情况，很有可能在行星成长期间，由于撞击熔融和重力分离，再结合内部放射性生热，而产生有差异的类地行星。上地幔的大范围熔融使得熔体、不相容的和易挥发的元素向上集中，并把致密的难熔晶体和熔体埋藏。致密的熔体包括 Fe, FeS 和在高压下形成的富含 FeO—MgO 的熔体。在地球大气圈和地壳中富集有挥发性的和不相容元素与在上地幔中缺失亲铁元素，指出正是这种非常有效的化学分离类型，使得出现轻薄地壳和致密地核。有来自地球和月球两者的证据，说明在这些星体形成初期完全被浓厚的岩浆海所覆盖。这种岩浆海的寿命取决于大气圈的温度、绝缘地壳的厚度，以及从外部通过撞击和从内部通过岩浆海底热边界层输送能量的速率。从结晶的岩浆海中去除晶体和从冷却晶体糊状物（学术上也称岩浆）排除熔体，是比冷却和结晶快得多的过程。因此，早期行星分异的期望结果是一个分层化的组成。

下面讨论非均匀吸积假说的一个似乎合理的变种。当星云冷却时行星增长，并且吸积的物质含有在该种温度下与星云相平衡的固体成分，和已经冷凝和逃逸吸积的更耐熔的物质。因此，行星的平均成分随着时间和半径增大而耐熔性减小。在星云消散后，类地行星继续缓慢吸积其附近的已经冷凝的物质和在太阳系中再远一点的地方冷凝的更具挥发性的

物质。在硅酸盐之前，难熔物质和铁全部被吸积是不必要的。总存在未被吸积的适用物质与气体相互作用，例如，铁在初期阶段作为金属被吸积，但是它与硅酸盐相互作用形成的铁镁硅酸盐却在后来被吸积。同样，铝、钙、铀和钍适用于与后来的冷凝物相结合，但是它们富集在早期冷凝物中。FeS 在低温下冷凝和吸积，除非早期冷凝过程已经去除了全部铁金属。

非均匀吸积假说是否成立，取决于在冷凝早期阶段上星云冷却和吸积的相对时间尺度。如果与沉积速度相比，冷却速度很慢，那么铁和难熔物质将形成原始行星核。换句话说，如果星云消散之前，地球附近的温度远远没有降到橄榄石-辉石稳定区域，那么冷却可能是很快的。在这种情况下，地幔中的镁铁榴石将添加上从星云的较冷部分摄动进入地球轨道的物质。最早的冷凝物也具有更多的吸积时间，并很可能在早期的致密星云中，经历了更大的粘性拖曳。在地球表面存在水和在上地幔中存在亲铁成分，表明在吸积晚期，不包含大量的金属铁 (Lange and Ahrens, 1984)。这样，有几种理由支持原始地球是耐熔的，并且随着时间的增加更富含挥发物。很明显，类地行星的大气圈是次生的，是由行星内部释气和晚期撞击的脱去挥发性成分的作用所形成的。一般认为，原始大气圈不是被强劲的太阳风就是被巨大的撞击所吹走。在地球形成初期，巨大的撞击可能已经使一些物质冲进月球轨道而形成月球 (见第二章)，在地球形成的晚期，巨大的撞击是造成各种古生物灭绝记录的主要原因。据认为地球上发现的某些陨石来源于月球和火星的表面，是这些星体遭受巨大撞击而产生的。

没有特别的理由确信原来只有 4 个或 5 个类地行星，其尺度与火星或月球相当或者更大些，实际上保留下来的物体消除了许多小行星，其机制是快速吸积。因此，幸存下来的类地行星的早期历程是激烈的，并以熔融和再熔融作用为特征。

陨 石

利用地球上的标本，我们不能在时间上向后追溯很远，或者不能向行星内部看得很深。陨石给我们提供了向这两个方向延伸的机会。某些陨石，如球粒陨石，在化学上是原始的，其成分非常类似于太阳的组成，但挥发性元素除外。富含挥发性元素的碳质球粒陨石是稍有变化的古代子星物质的样品，该物质在中等温度至低温下在太阳星云中冷凝。非球粒陨石是非太阳成分的分异物质，它曾经经历了象影响过所有已知的地球和月球岩石那样的化学过程。

陨石分为三大类：铁陨石（或陨铁）主要由金属组成；石陨石由硅酸盐组成，并含少量金属；铁石陨石（或古橄铁镍陨石）含有丰富的金属和硅酸盐。这些陨石可进一步分类，详见表 1-1。

碳质球粒陨石

碳质球粒陨石含有非常丰富的挥发性成分，象水和有机化合物，其密度低，并且含有近似等于太阳比例的重元素。它们也含有碳和磁铁矿。这些特征说明，自它们形成后它们一直没有强烈受热、压缩和变化；也即是说它们没有被深深埋入行星体的内部。

C1 或 C I 陨石在它们原始特征上是最极端，并被用来补偿宇宙组成计算中的太阳数

表 1-1 石榴石和铁陨石的分类和特征(元素, 重量百分比; 按原子百分比计算的比值)

陨石类型	矿物	S	O	Fe ^T	Fe ^o	$\frac{\text{Fe}}{\text{Fe} + \text{Mg}}$	Al/Si	Ca/Si	Mg/Si	备注
石质陨石(占陨石总数的 95%)										
球粒陨石(占 86%)										
碳质陨石(5%)	层状硅酸盐	5.9	46.0	18.4	0		0.086	0.072—0.088	1.05—1.06	锆球粒
CI = CI	(“粘土”)									
例如, Ivuna; Orgueil	18—22 pct H ₂ O									
C2 = CM = C II	6—16 pct. H ₂ O	3.4	41.5	21.9	0—1		0.084—0.094	0.072	1.02—1.04	
例如, Mighei; Murchison										
C3 = C III	橄榄石	2.2	36.5	25.2	0—8	6—23	0.092,	0.074,	1.05	
例如, CO = Ormahs	耐熔矿物						0.12—0.14	0.09	1.12	
CV = Vigarano	矿物									
Allende	< 4 pct. H ₂ O		35.9							
普通陨石(81%)										
E = 顽辉石	顽辉石, Fe-Ni	3.3—5.9	29.3	25—33	19—25	0.04—1.4	0.048	0.036	0.73—0.81	F ₈₀ SO ₂
例如, Abee; Khairpur										FeS, CaS
H = 高铁 = 古铜辉石质	橄榄石	2.1	35.1	27.6	15—19	16—19	0.06—0.07	0.05	0.95—0.97	Fa _{15—19}
	古铜辉石, Fe-Ni									Fs _{15—17}
L = 低铁 = “紫苏辉石”	橄榄石	2.1	38.1	21.8	4—9	21—25	0.061	0.048	0.92—0.94	Fa _{22—25}
	古铜辉石 Fe-Ni									Fs _{19—22}
LL = 铁含量很低 =	橄榄石	2.3	38.8	20.0	0.3—3	27—32	0.062	0.046	0.92—0.93	Fa _{26—32}
球粒古铜辉石										Fs _{22—25}
= Soko = Bcmja										
光球粒陨石(9%)										
贫钙的	橄榄石	0.5	45.4							
橄榄无球粒陨石 = 橄榄石	易变辉石			14.5	0.3—6	10	0.016	0.023	1.37	
易变辉石	Fe-Ni			20.6	1	25	0.042	0.015	1.28	

续表

陨石类型	矿物	S	O	Fe ^T	Fe ⁰	$\frac{\text{Fe}}{\text{Fe} + \text{Mg}}$	Al/Si	Ca/Si	Mg/Si	备注
**纯橄无球粒陨石 = 玄武岩质的										
顽辉无球粒陨石 = 顽辉石质	顽辉石			1.0	<1	<0.03	0.02	0.021	1.0	
• 古铜无球粒陨石 -	斜方辉石	0.4		13.5		25—27	0.034	0.029	0.74	Fe ₂₃₋₂₇
“紫苏辉石”										Aug-90
“堆积岩”										
富钙的			42.4							
• 紫苏钙长无球粒陨石和	斜方辉石	0.27		13.9	<0.3	25—40	0.191	0.137	0.47	
• 钙长辉长无球粒陨石 = 玄武岩质	易变辉石	0.20		14.4	<0.1		0.290	0.234	0.22	
例如Juvinas,	斜长石					50—67				
Pasamonte Stannern										
Moore Co										
钛辉无球粒陨石 = 普通辉石质	普通辉石	0.45		7.5			0.233	0.595	0.34	
**辉橄无球粒陨石 = 玄武岩质	Cpx, ol	0.06		16.6			0.042	0.332	0.37	
**谢果陨石 = 玄武岩质	Cpx, Plag									
石铁陨石(1%)										
• 中铁陨石	斜方辉岩	1.1			44—52					
	斜长石									
	Fe-Ni									
橄橄陨铁	橄橄石, Fe-Ni	0.19		69						
铁质陨石(4%)										
奥克铁陨石类	Fe-Ni	0.02—0.09			90.5—92					
方陨铁	Fe-Ni	0.06			93.6					
富镍铁陨石	Fe-Ni	0.08			79.6					
• 辉长岩组合										
• • SNC 组合										