

Tectonophysics of Paleo-Tethyan

东亚古特提斯域 大地构造物理学

杨文采 著

石油工业出版社

东亚古特提斯域 大地构造物理学

杨文采 著

石油工业出版社

内 容 提 要

该书综合运用系统论、信息论、地质学、物理学的知识,从总体上解剖了古特提斯域的时空属性,并分苏鲁超高压变质带、大别超高压变质带、秦岭造山带、塔里木盆地、昆仑山地质与构造演化五个部分详细阐述了其区域地球物理特征。书后还以附录的形式给出了有关系统论和非线性动力学方面的认识。本书具有很强的创新性、前瞻性和系统性,是难得的优秀科学著作。

本书可供地质与地球物理研究人员及对宇宙与自然规律感兴趣的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

东亚古特提斯域大地构造物理学 / 杨文采著.
北京:石油工业出版社,2009.9
ISBN 978-7-5021-7133-9

I . 东…
II . 杨…
III . 大地构造学:构造物理学 - 东亚
IV . P313

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 069227 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里2区1号 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
发行部:(010) 64523620
经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:28.5
字数:723千字 印数:1—1500册

定价:128.00元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

前言

一本书的前言要交代 3 个问题：作者为什么写这本书？谁来阅读本书？怎样读本书？笔者写本书主要是觉得自己年事已高，要把一些与别人不同的理念展示出来与同仁们探讨，或许还可对心灵相通的后来者走捷径有所帮助。科学研究就是与自己的愚昧作战，永远没有持久的胜利。几十年的地学研究使笔者认识到的理念有以下两点：

(1) 人类了解地球后可以与她沟通，修补她的不完美，但是不要去改变她的行为属性。

(2) 不要低估自然的力量。任何改造自然的举动都要面对自然的报复，付出的代价可能很惨重。

做学问最好是向名师当面请教，这种机会非常难得。笔者有机会当面请教于地学名家威尔逊、摩根、勒皮雄、伯克和黄汲清、陈国达等，他们改变了笔者的兴趣和研究方向，使笔者在写此书时尤怀感激之心。如果无缘得见名师大家，那就看他们的著作，了解他们思考的问题，尤其是反复思索吃不准的问题。他们独特的思索很可能是新研究领域的源头。一本书的精华不在字面上，是在书面背后的精神上，需要仔细品味。看书和上网不同之处，就在于此。

这可能是笔者计划写的最后一部专著，因此想尽可能把自己的理念写在本书中。抄书容易写书难，难在要有独到的理念，而这些理念要站得住脚。因而写书不仅仅是表达理念，而且要阐明证据。在 70 岁以前把自己的理念系统地写出，与专业学者交流，也是人生一大快事。

看书如看戏。观众看场面与情节，戏迷看表演功夫。话剧、京戏、芭蕾舞，各有各的风格。京戏简练、从容、含蓄、精粹。近来全球化与现代化节奏太快，而京戏的节奏还是那么慢。因此，看京戏的观众越来越少。这本书是按京戏的节奏来写的，不知道会不会不合时宜。习惯于在网上搜罗资料来编写文章者，恐怕不适宜看本书。

本书分 8 章。对中国地质的理解取决于对地球系统的深入认识。古特提斯洋的封闭与中国中央造山带的形成演化，涉及中国地质转折的时空枢纽，了解它就从总体上把握了中国地质。人们看风景总是先鸟瞰后细节，遵循 LOD (Level of details) 的原则。首先从地球系统开始阐述笔者的理念，第 1 章谈大地构造物理学，表述笔者对地球内部探测成果的理解，包括从系统论、信息论、地质学、物理学的多种角度的思考。为方便读者阅读，涉及有关系统论和非线性动力学方面的认识，分别在附录 A 和附录 B 中以笔记形式给出。第 2 章讨论中国地壳上地幔概况，也源自笔者多年的探索。第 3 章从总体上解剖古特提斯洋的时空属性，然后用 5 章分段讨论其区域地球物理特征。

读了半个世纪的书，笔者喜欢纯粹的书。笔者这一代人得益于邓小平的改革开放政策。十几年前学习邓小平理论时，对他纯粹的思想深感敬佩，曾写过以下几句心得：

纯粹的思想

清明的社会来自纯粹的理论
混乱的管理源于僵滞的思想
纯粹的思想净化人民的心灵
久旱的甘霖孕育美丽的生命

古人云：繁词复说，道之蔽也。希望这本书不神秘、不虚玄，能准确地表达一点点纯粹的思想。

感谢笔者的老师和同事们多年来的培养、支持和帮助，否则笔者将一事无成。

感谢祖国和人民，希望祖国永远繁荣昌盛，持续发展。

作者

2009年8月29日于北京

目 录

1 大地构造物理学导言	1
1.1 大地构造物理学概说	1
1.2 地壳上地幔组构与属性	28
1.3 典型的大陆行为	46
1.4 几种特殊地质作用的探讨	65
参考文献	74
2 中国地壳上地幔概况	78
2.1 中国东部地壳上地幔	78
2.2 中国西北塔里木盆地地壳上地幔	83
2.3 中国中部地壳上地幔	90
2.4 关于环渤海地幔柱	94
2.5 关于地壳上地幔探测	103
参考文献	135
3 东亚演化与古特提斯洋	140
3.1 东亚大地构造概要	140
3.2 中国及邻区的古海洋及板块碰撞作用	144
3.3 古特提斯洋碰撞造山会聚带	155
3.4 中国大陆的构造格架	162
3.5 大陆属性与系统行为的相图	164
参考文献	178
4 古特提斯洋会聚带东端：苏鲁	180
4.1 古特提斯洋苏鲁带北部综合地球物理调查	180
4.2 古特提斯洋苏鲁带南部综合地球物理剖面	195
4.3 苏鲁造山带岩石圈	202
4.4 苏鲁造山带上地幔	218
参考文献	231
5 古特提斯洋会聚带东部：大别	235
5.1 古特提斯洋大别造山带综合地球物理剖面	235
5.2 中朝与扬子克拉通的碰撞与旋转	244
5.3 郯庐断裂带的深部构造	254
5.4 中国东部的多重地震拱弧构造	259
参考文献	268
6 秦岭造山带	273
6.1 秦岭造山带的地壳上地幔	273

6.2	大别—苏鲁造山带与秦岭的构造对比	280
6.3	川甘青复理石盆地	288
6.4	关于阿尼玛卿和巴颜喀喇	295
	参考文献	298
7	塔里木盆地与古特提斯洋	300
7.1	塔里木盆地地质概况	300
7.2	显生宙大地构造事件	310
7.3	塔里木盆地与世界油气资源	317
7.4	阿尔金转换断裂带	322
	参考文献	330
8	昆仑造山带地质概况与构造演化	333
8.1	地质地球物理概况	333
8.2	东昆仑地质概况	337
8.3	西昆仑及其前陆逆冲带	342
8.4	西昆仑地区沉积—构造演化史	363
8.5	中央造山带西段的地质构造演化	367
8.6	特大型固体矿产与大地构造	369
	参考文献	375
附录 A	系统论笔记	378
A.1	不同角度看系统	380
A.2	系统的表象：秩序	381
A.3	有序、无序和没有秩序	382
A.4	熵：系统无序的度量	383
A.5	混沌	384
A.6	系统的萌芽：相遇与互动	386
A.7	相遇是一种自然选择	387
A.8	科学家中的异类	388
A.9	自组织导致耗散结构	390
A.10	一部描述自组织过程的历史长卷	392
A.11	涌现：第一加法定理	394
A.12	束缚：第二加法定理	395
A.13	互补与对抗	396
A.14	中庸：调控系统平衡的艺术	397
A.15	演化与进化	398
A.16	人类社会文明了吗？	399
A.17	不见可欲	400
A.18	人造机器——系统组织的典范	401
A.19	控制、自动控制与自然调节	402
A.20	信息与组织	403

A.21	自发的组织与学习的组织	405
A.22	控制与反控制、器官	406
A.23	信息和基因	407
附录 B	非线性动力学笔记	410
B.1	系统演化轨迹的多样性	410
B.2	线性与非线性	411
B.3	突变与间断	412
B.4	相变、去组织临界与自组织临界	414
B.5	二齿分岔 (Pitchfork bifurcation)	416
B.6	复杂分岔和谱系	419
B.7	双变量微分方程：心脏系统	423
B.8	三变量微分方程：蝴蝶效应	425
B.9	动力学演化轨迹的吸引子	426
B.10	多变量动力学系统	428
B.11	互动与协调	429
B.12	突变论	431
B.13	间歇 (Intermittency)	433
B.14	怪圈与循环	435
B.15	从系统论看人类社会系统	437
参考文献 (附录 A 和附录 B)		443

1 大地构造物理学导言

板块构造学说给人的最重要启示就是, 表观无比复杂的地质现象, 原来可以用非常基础的物理学定律来解释清楚。因此, 进一步创立新地球观的研究路线, 无非是攻破物理学与地质学之间的壁垒, 建立以物理学为构架的地质构造学说。

固体地球物理学是以物理学为指导研究地球表面以下物质行为、属性、相态和组织结构的科学。由于地球表面以下的主要物质为岩石, 因此称为固体地球物理学。固体地球具有准圈层结构, 从表向里包括岩石圈、软流圈、地幔和地核。研究岩石圈和软流圈的固体地球物理学分支称为大地构造物理学, 研究地幔的固体地球物理学分支称为地幔物理学, 研究地核的分支称为地核物理学。研究石油天然气和固体矿产资源勘查的分支称为应用地球物理学。

地球物理学在 20 世纪初属于物理学的范畴, 内容包括地震学、重力学、地磁学、大地电磁学、地热学等。自 1960 年以来, 由于数理科学与信息科学快速发展的推动, 作为新兴科学的固体地球物理学展现了蓬勃发展的态势, 在现代科学革命中呈现出连接数理、地球和信息三大科学领域纽带的重要角色, 在社会可持续发展中更体现了不可替代的重要作用。以板块构造学为先导的地质革命, 促使固体地球物理学发生了关键性的变革, 固体地球物理学从传统的观测方法技术研究, 转向以物理学为指导研究地球表面以下物质行为、属性、相态, 并期望进一步查明固体地球演化的动力学机制。作为本专著的第 1 章, 笔者拟概述以物理学为指导研究地球表层物质行为、属性、相态的新理念, 与读者共同讨论这一科研前沿的体会。

1.1 大地构造物理学概说

“宇”为无边际的空间, “宙”为无穷尽的时间流, 宇宙就是无垠的时空。地球的历史必须在广域的时空维中分析比较, 考察其演化走向及各种促成因素, 才能全面客观地找出其内在规律。大地构造物理学是在 20 世纪 60 年代板块构造学说建立之后, 把全球的岩石圈和软流圈作为研究的对象, 沿着当时地球物理学的研究路线, 继续扩展地球科学研究创立的领域。因此, 自 20 世纪 70 年代至今, 可称为地学界的后板块时代, 这个时代的目标在于创立一门系统地揭示岩石圈和软流圈运动规律的科学, 即大地构造地球物理学。这一目标虽然尚未实现, 但由于岩石圈和软流圈具有区域性, 因此大地构造地球物理学的研究大大地推动了区域地球物理学的发展。本章从讨论板块学说的不足之处入手, 结合中国及邻区的情况, 讨论大地构造地球物理学的基本理念及区域地球物理学研究的出发点。作为当前大地构造物理学的一个前沿领域, 虽然区域地球物理学研究本地区地壳上地幔的行为与属性, 但其视野和归宿都具有全球性, 反映出全球地质作用的各态遍历规律。

自从 20 世纪 70 年代板块构造学说确立以来, 地球动力学作用的研究吸引了众多地球

科学家的兴趣, 相关的研究项目层出不穷, 取得的数据总量已超过了以前固体地球数据的总量。虽然到目前还没有实现地球科学继板块学说之后的再一次革命, 但是人们对大陆内部动力学作用复杂性的认识已经大大提高了。大陆动力学是正在发展中的交叉学科研究领域, 其核心是认识地球内部复杂的动力学系统的行为、组成、结构和作用机制。以建立在现代科学观测与实验数据基础上的新认识, 来剖析中国大陆内发生过的主要动力学作用, 了解其萌芽、发育、鼎盛与衰亡的过程及其规律性, 不仅是时代对地球科学发展的要求, 也是中国地球科学家义不容辞的责任。

大地构造物理学是一门结合板块构造和地球物理学的边缘学科, 是新大地构造学说的理论基础之一。大地构造物理学研究注重演化的细节、过程和证据, 以及它们与物理学定理的兼容性。地球是一个整体, 一个区域构造单元是其中相对独立的组成单位, 对区域内观测到的丰富多彩、而且貌似矛盾的各种地球物理资料, 地球物理学家并不能凭空创造些什么, 只能以他的知识与经验去寻找地球内部物质运动的证据, 并把它们集合起来, 序列起来, 最后求得对区域地质演化的系统理解。如果他不具备系统的大地构造物理学知识, 他的解释就不免肤浅或者流于想象, 就难以准确地抓着区域演化的脉络和证据, 形成准确客观的认识体系。大地构造物理学从研究地质作用产生的“指纹”入手, 了解地质作用的行为和属性, 以及它们发生的环境和动力机制。由于近年来大地构造物理学取得了重要进展, 使地球科学家得以在深入与系统总结全球地质演化的基础上, 着手解决本国或本地区的地质构造的动力学问题。

地质科学(包括地质学、固体地球物理学和地球化学)是一门观察的科学, 也是一门不断进行实验的科学。遗憾的是, 地质科学的实验还只能是小尺度的, 而不能是全球性的和大尺度的, 因此地质科学假说的验证极其困难, 这就使得地质学自身的理论“缺乏牢固的基础”。自诞生之日起, 地质学家们一方面在耐心地积累观察和实验的数据, 另一方面关注着物理、化学与生物学等其他基础学科的发展, 以便不断更新地质学的学说。如果我们用公式“地质学 = 相关基础科学的理论 + 地质资料”来表示现今的地质学也许并不过分, 因为地质学、固体地球物理与地球化学目前还缺乏自身的完善理论构架即定律与定理的逻辑体系。如果现今的其他基础科学可以不加约束地应用到地质学与地球动力学中来, 我们依然可以按照上述公式来发展地质科学。可是, 在 21 世纪我们已经走到了这样一个临界点: 过去被当作原理引用到地质科学中的经典力学、平衡态化学及达尔文进化论在它们各自的领域里不断地被质疑, 使我们不得不重新考虑它们对固体地球这一复杂巨系统的适用性。

过去 30 年来, 在系统论、非线性动力学(混沌理论)、远离平衡态热动力学与化学动力学和分子生物学发展的共同推动下, 越来越多的地质学家认识到应用系统论与非线性动力学的观点方法认识固体地球内部各种作用过程的重要性, 进行了不少努力, 并在以下三点上取得了共识: (1) 固体地球系统是一个极复杂的开放的巨系统; (2) 这种巨系统在空间结构上包含多种尺度层次的子系统, 它们在空间上是自相似(分形)的, 而在随时间的演化上是不可逆的; (3) 固体地球内部的地质作用过程包括具有线性特征的渐变, 也有对应远离平衡状态的突变。由于经典的地质学理论对后者无能为力, 引入混沌理论来解释复杂的地质作用引起了地学界广泛的兴趣。但是, 由于混沌理论及远离平衡态系统的理论本身还很不完善, 地质科学家们还未在更多的细节问题上取得更多的共识。

1.1.1 大地构造物理学的研究领域

大地构造物理学是一门结合板块构造和地球物理学的边缘学科。其实，大地构造物理学并不是固体地球科学的一个分支，而是近 50 年来活跃在地球科学前沿的一个跨学科研究领域，涵盖了大地构造学、地球物理学、地球化学和地球动力学研究的精华（图 1.1），引导着地球科学的发展走向。例如，当前在地球动力学研究中提出的大多数科学问题，并没有直接面对固体地球内部物质运动驱动力来源，而仅涉及地壳、地幔的结构、构造、运动特征等非动力学内容，都属于大地构造物理学的范畴。在图中把地质科学按研究的层次分为资料观测与采集、资料分析处理、综合研究与应用三个层次。地质学中的大地构造学及相邻学科，与地球物理学、地球化学共同组成的研究领域，构成大地构造物理学的主体。固体地球是由岩石组成的，因此最基本的地质作用为成岩作用和熔岩作用，包括岩浆活动、沉积作用、变质作用。岩浆活动分成两类：一类是岩浆结晶为岩石的作用，这是结晶学、岩石学、火山学的研究内容；另一类是岩石熔融为岩浆的过程，以下将详细讨论。

近 40 年来大地构造物理学的发展可用图 1.2 的三维坐标系来概括。图中的 x 轴表示地

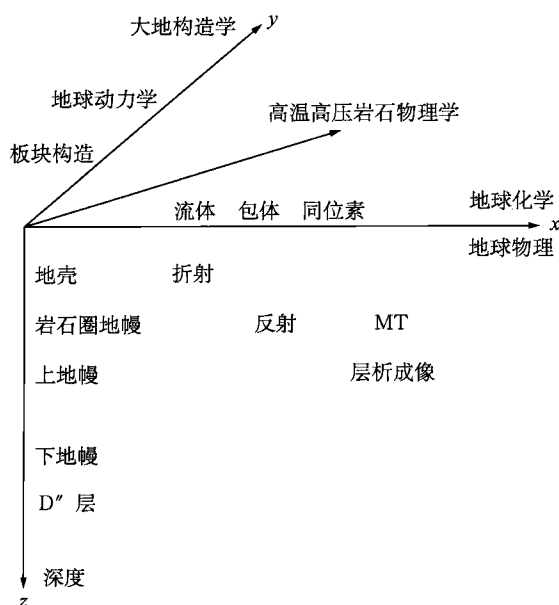


图 1.2 大地构造物理学进展分解图

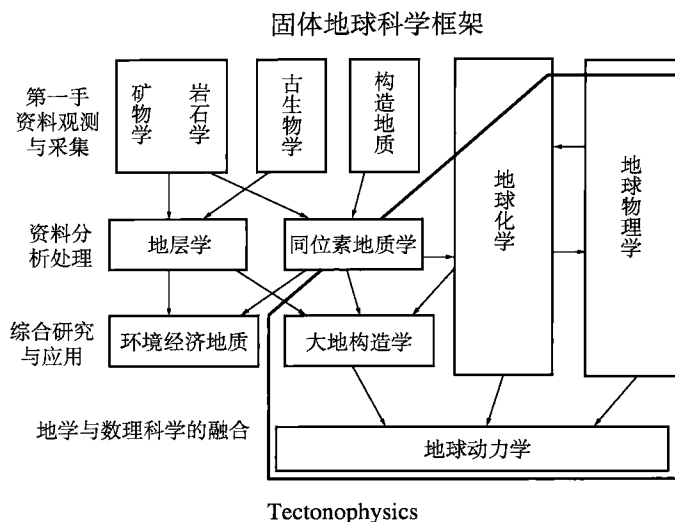


图 1.1 固体地球科学分支关系略图
斜框内表示大地构造物理学的研究领域

球物理与地球化学探测的进展：前者从古地磁学、地热学、广角折射地震和大地电磁法 (MT) 向高分辨率的深反射地震及远程地震层析成像发展；后者包括包体显微观测及流体包裹体同位素地球化学研究等。图 1.2 的 y 轴沿大地构造学发展走向，从板块构造到全球构造演化研究、再到地体说、地幔柱说与大陆边缘的研究。介于两轴之间还有一个重要的方向，即高温高压下岩石物理学、热动力学和流变学等支撑学科的研究，也取得了快速的发展。 z 轴表示随着探测深度增加对深部地质作用过程的研究，从地壳作用与壳幔相互作用，到地幔地质作用及核幔边界的研究，一步一步地深化。

回顾大地构造物理学的研究历程 (Kirby, et al., 1987; Pakiser & Mooney,

1989; Evans, et al., 1991; Meissner, et al., 1998; Richards, et al., 2000; King, 2001; Marone, et al., 2004; Foulger, 2005), 可知她的领域虽然广泛, 但研究路线主要从发现地球物理化学性质的非均匀性(即地学“指纹”)出发, 根据物理、化学原理分析非均匀性的分布规律和产生原因, 逐步推演相关地质作用的初始、边界条件, 找出关于壳幔组成结构和物质运动的证据。这条研究路线今后仍将继续下去。

1.1.2 关于地球起源与地球内部系统

笔者认为, 自然系统可分为以下3类:

- (1) 高度自组织的开放系统, 如高级生命; 能够再生, 吸收外部能量降熵。
- (2) 具有自组织功能的耗散系统, 如太阳系、地球; 能够通过自我调节控制增熵速度。
- (3) 自组织功能低下的耗散系统, 如自发的短寿系统(月球、苔藓); 不能够通过自我调节控制增熵速度。

地球包含了3个系统:

(1) 地球外部系统, 即月地系统。从哥白尼到牛顿, 人类早就认识到这个系统的运转规律, 并开创了近代物理学。

(2) 地球表面系统, 其底层为岩石圈。由大气、水、岩石、动物植物和人类组成的这个系统, 在太阳能量的支持下, 不断循环流动, 其规律成为地理学、气象学、冰川学、水文学、生态学等多门学科的研究对象。

(3) 地球内部系统, 其顶层为岩石圈。本书只讨论地球内部系统。在后续的讨论中, “地球”就是地球内部系统的简称。

地球内部系统具有自组织功能的耗散系统, 能够通过自我调节控制增熵速度。因此地球是具有创造力的。地球创造了地磁场以抵御太阳风的袭击, 创造了地壳以防止内能散失, 创造了海洋以形成水的循环, 等等。有创造力才能各态遍历(见1.4节), 地球内没有完全相同的两个矿床, 也没有完全相同的两块岩石。柏格森曾认为, 地球内部系统是“创化”系统, 即具有创造力的演化, 而不仅仅是单纯的演化。在使内部组构分异的越来越丰富的同时, 行为及相态越来越多元化及复杂化。地球创造力的来源, 是宇宙之谜, 地学永恒的主题。

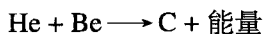
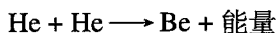
如何认识地球内部系统? 大地构造物理学的研究路线是: 通过其行为的记录或重建、属性的探测和相态的分析, 查明系统组元作用、内部组成结构和自组织规律。我们先讨论地球系统的起源, 然后再讨论行为、属性和相态。

天文物理学家根据波谱红移现象的观测, 可知宇宙现代仍处于膨胀状态, 而且主要组成元素为氢(72%)和氦(27%)。于是推测, 宇宙起源于一个奇点性质的单元, 温度过亿度, 因此不可能由原子结构组成。然后, 大约于 $(180 \sim 160) \times 10^8 \text{a}$ 前, 发生了大爆炸。于是, 宇宙诞生了, 而且不断地膨胀, 形成今天有序、复杂和神奇的宇宙。

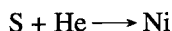
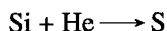
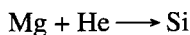
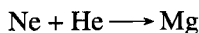
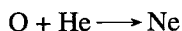
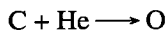
那么, 是什么力量促成了大爆炸并建立了宇宙的秩序? 基督教认为是上帝, 自然不可能有这种力量与智慧。史宾诺沙认为自然就是上帝。“老子”第25章说: 有物混成, 先天地生。寂兮寥兮, 独立而不改, 周行而不殆, 可以为天地母。……人法地, 地法天, 天法道, 道法自然。也说宇宙诞生于混沌, 因此混沌的存在先于宇宙。混沌世界广阔无垠, 清虚而静止, 这是一种非常独特的失衡状态; 它无处不有、无所不在。混沌是天地之母, 其性质难以用人类的语言来描述, 混沌就是自然的精华, ……人类社会应遵循地球演化规律

的发展，地球遵循宇宙演化规律发展，宇宙遵循混沌规律的发展，而混沌遵循自然规律的发展。

大爆炸的结果是温度下降、核聚变并产生了大量的最简单原子：氢和氦，并释放出大量能量。这些携带强能量的原子高速旋转，在碰撞中由引力化学亲和力的作用结合成气团 (Fowler, 1993; Davices, 1999)。气团外部不断扩大，而内部物质不断紧缩成核，最后形成了恒星。在这个过程中，引力造成的物质紧缩产生大量的热，造成核升温 and 其中氢气的燃烧，形成了大量的氦气。氦气的熔融又形成了对构成生命起关键作用的另一个元素——碳：



对于体积大的恒星，与氢核聚变相关的化学反应还会产生其他元素：



与氢核裂变相关的化学反应还会产生钴与铁。当高密度的铁沉入恒星核之后，核聚变将逐渐停止，不再产生能量，行星核也开始变冷。随着氢气的燃烧，热和形成的气体不断散入太空，恒星后来转向变冷。

太阳是宇宙银河系中的一个小恒星，其形成的过程与上述恒星形成过程大同小异。 $47 \times 10^8 \text{a}$ 前宇宙游离的气体云团，含有大量的 He 和 H，宽度大约为 2 光年。云尘中还含有 Si, Fe, C, Cu, O, N, CH_4 ，以及它们的简单化合物。云团在收缩和旋转加速时渐渐变为碟状，并变为灼热的气尘旋涡 (eddies)，加速了物质的聚集，从而生成了陨石质的原始星球。根据同位素年龄测定，最古老的陨石的年龄为 $47 \times 10^8 \text{a}$ ，因此推测原始太阳系生成于 $47 \times 10^8 \text{a}$ 前，在气尘旋涡的中心，高温高速运动的气尘激发热核反应，使原始太阳发生燃烧，部分轻物质甩出旋涡中心（可能在其他小天体撞击的触发之下），成为行星，地球就是其中之一。

太阳系是一个非常有序的自组织系统，其有序程度之高令人惊奇，因为这种有序性可由 Bodes 定律定量表示出来，这个定律指出，太阳系中每一个行星到太阳的距离是其内邻行星至太阳距离的两倍。如果把金星到太阳的距离写为 1 个单位，则水星到太阳的距离为 2，到地球的距离为 4，到火星的距离为 8，到小行星群的距离为 16，到木星的距离为 32，到天王星的距离为 64，到海王星的距离为 128 等。大火星与木星之间有一群小星体，这是太阳系形成时残留下来的流离物质碎片，围绕太阳旋转。太阳系中小行星群的出现流露出自然的脾气：追求各态遍历而不是十全十美。

在 $46 \times 10^8 \text{a}$ 以前，太阳系旋涡中心甩出的部分物质形成了一些大气团，随后，发生了吸积作用，其中的一团不断地吸收宇宙中的尘埃及小气团，成为处于“气团”相态的原始地球。气体云团含有大量的 He 和 H, Si, Fe, C, Cu, O, N, CH_4 ，以及它们的简单化合物，如水蒸气。在吸积过程中，由于分子团块的碰撞、外部小天体的频繁撞击和短周期衰

变的放射性物质发出巨量热能,使原始地球升温,直到超过 5000°C ,变为液体星球。这就是处于“热汤”或“火锅”相态的原始地球。在原始地球不断旋转(自转)的环境下,由于重力分异作用,重物质向下凝聚,固相的地核自发地发育,开始形成了气、液(熔浆)及固“三相”的地球,从混沌状态走向秩序。根据月球及其他行星资料的对比可知,在 $(45 \sim 41) \times 10^8\text{a}$ 以前,太阳系频繁地受小天体撞击,但在 41Ma 之后,小天体撞击事件变得稀少,地球的吸积作用也胜利完工,地球结束了她的“原始”阶段,进入了有地壳岩石记录的太古代。原始地球在生成后的 $5 \times 10^8\text{a}$ 中,虽然发生了惊天动地的变化,但是没有留下很多痕迹。可以推测的是,由于短周期放射性元素的快速蜕变,地球形成 $1 \times 10^8\text{a}$ 以后热平衡方向逆转,原始地球由升温(火锅相态)逐渐冷却(三相分离)。与此同时,通过火山岩爆发作用,地球大量放气,除氢气之外, NaCl 释出 Cl 气, AgNO_3 放出氮气氧气等。火山喷发放出的气体液体包括 H , HCl , SO_2 , H_2O , N , CO_2 , CO 。原始的云团外围气体加上火山放气形成了很厚的气圈,含大量水蒸气,几乎完全阻挡了阳光的穿透。直到水蒸气在地球随后的冷却过程中形成水滴,使天空发生了第一次降雨,云层才得以撩开。值得强调的是,原始地球中的大量气体,现今仍然被岩石圈包裹在地核与地幔裂缝中,通过地球的去气作用渗透到地壳,成为人类社会可持续发展的有用资源。

天空中的第一次降雨对地球演化而言实在太重要了。太阳系中别的行星或卫星可能有冰,但都不会降雨。降雨与蒸发构成了水在地球表面的循环,在“热汤”的基础上形成了原始的海。 $(41 \sim 38.5) \times 10^8\text{a}$ 前,地球进一步冷却使降雨规模扩大,全球由海洋覆盖,海水 pH 值大致为 0.3 左右,最古老的沉积岩揭示了此时湖泊和海洋的存在。大约在 $38.5 \times 10^8\text{a}$ 以后,火山作用形成了一定规模的陆地,陆地上的盐被雨水溶解而流入海洋,使海水 pH 值升高到 0.5,使海洋成为低级绿色植物的起源之地。从古太古代沉积岩石分析资料可知,此时地球表面是缺氧的,直到 $30 \times 10^8\text{a}$ 前,反映铁离子氧化的“红层”才出现在太古宙地层中,说明大气中 O_2 才积聚到一定数量。氧气的积聚主要分两种途径:一是水的分解, $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}$, 这是很缓慢的过程;另一是植物的光合作用,即 $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{光子} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$ 应该是大气中氧气的主要来源。有水才有生命,在 $38 \times 10^8\text{a}$ 以后,合成生命的条件成熟了,地球表面开始生长出地衣、苔藓等植物,它们顽强地繁殖下来,不断为大气圈增加氧气的成分之后,古生物学展示了令人赞叹的生命演化史。

最后讨论一下地球系统内部自组织和去组织力量的问题。近年来,“地球动力学”等类似的词炒得火热,成为时尚,而讨论地球形成演化动力的文献寥寥无几。笔者认为,万有引力、热力、化学亲和力和电磁力都与地球形成演化动力有关。例如,地球内部流体的自旋产生的电磁力,对保护地球免受太阳风袭击而进入稳定相态就起了关键作用。化学亲和力是一种微观的原子间的键合力,在物质世界无处不在。地球内部的能量主要是与生俱来的内能,即放射性物质产出的热能及其促成的内核流体的动能、电磁能,以及积聚在固体圈层中的化学能、重力势能、热能。地球内部的准圈层结构使地球内部成为防范能量消散的准封闭系统。热力学第二定律说明固体地球演化的总趋势为能量消散与熵增。大约在 $40 \times 10^8\text{a}$ 前地幔开始形成,以后又形成了大陆岩石圈,地球内部热能量才被禁锢起来,地球的创造力可能来自引力与热力微妙的平衡。

地球系统的自组织在维护系统整体运转的同时,使内部组构越来越精密丰富,行为及相态越来越多元化及复杂化。自组织也对组成系统的异质组元产生约束与强制,天长日久,

这种束缚会转化为反抗组织的力量，这就是去组织。系统是内部自组织和去组织两股力量的交汇与冲突，对了解地球行为至关重要。去组织的力量为热力。热能产生浮力及膨胀力，其主要方向是向外径向的，效应为冲击与破坏封闭性的固体圈层。相反，重力和化学力是向内的亲和力，其效应为建设加固封闭性的固体圈层。地球系统内部这两种力量的较量反映了自组织和去组织两股力量的交汇与冲突，决定了地球系统的行为与相态。

地球内部系统是以固体的和熔融的岩石为主体的三相介质系统，以重力和化学力驱动的成岩作用和以地核热力驱动的熔融作用及岩浆活动，协同交替地调节着地球内部的热力学平衡，维护地球内部系统的稳定运作：物质与能量的循环、对流和地应力的均衡。地球也向大气与外太空辐射能量，其能量来源为炽热而且活动的地核，通过热传导向地面传递。地球系统的热能消散还与大陆裂解或会聚有关；会聚时消散减少，裂解时消散加快。由于上百公里厚的大陆岩石圈的热导率低，为了尽可能保持地球的内能以减少向外热辐射，地球逐渐扩大了陆地的面积。但是，大陆岩石圈底部长期的热积累和由核幔边界升起的巨型热羽柱有可能使中幔圈温度过高而熔融，破坏准封闭的地球内部系统。中幔圈是围堵外核炽热流体的铜墙铁壁，是保证积聚在地核的内能库不至于崩溃的地方。当地球内部过热、岩石熔融区扩大时，地球自组织表现为上方大陆的裂解和岩浆的外涌，以及其对海底扩张与板块运动的推动。当地球内部过冷、岩石熔融区萎缩时，地球自组织表现为大陆的聚敛与超级大陆的形成，以及其对太空热辐射的减少。自组织的大陆张裂和会聚、结晶成岩、火山地震等作用成就了一个动力持久的地球，一个美丽而奇异的生命家园。

总而言之，地球内部系统是一种自然的耗散系统，其能量依赖于生成时积累的内能，其自组织体现在尽可能封堵初始能量的消散上。这个过程是通过中幔圈与大陆岩石圈加厚实施的，地球内部系统尽可能维持其准封闭状态，乃是自然惯性的最原始体现。

1.1.3 地球的行为、属性和相态

认识自然与社会系统有两条平行线：行为、属性、相态，指对系统宏观的、多方位的观察和认识。结构、组织、演化轨迹，指对系统微观的、深入的分析与解剖，以说明系统行为、属性、相态变化产生的原因与机制。前者是系统表象的剖析，引导研究的布局，汇总研究的成果。后者是研究的目标，构成研究的方向。对系统研究而言，两者缺一不可。

什么叫系统？系统是由处于相互作用之中的多个组元构成并依照某种规则组织起来的运动体系。地球内部系统的结构、组织剖析与表象见图 1.3 系统。

地球内部系统的结构反映在其属性上，当前大地构造物理学的研究对象仍然是地壳上地幔的行为、属性、相态。这些问题不搞明白，研究地球的组织 and 内在规律就没有基础。这就是地球物理学与物理学不同的地方。组织包含着自组织和去组织两个方面，我们的要点放在自组织的探讨上，以求搞明白如下问题：地球的行为是怎样发生的？地质作用的相态为什么会发生改变？相态的改变是否会影响地球组元的属性？等等。

物理学研究的对象是某种运动的物质，

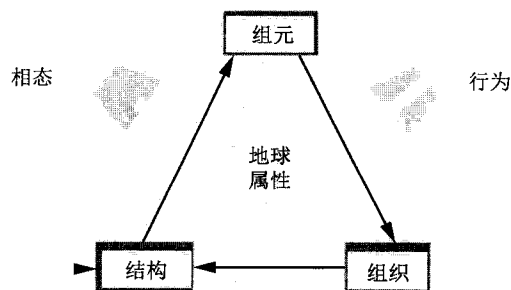


图 1.3 地球内部系统剖析

即某种动力学系统。行为指研究对象与载体或共存体之间，以及内部组元之间的相互作用过程。社会的行为包括政治的、军事的、文化的、经济的，等等。地球的行为包括各种地质作用，与其他星体的撞击，太阳风、日冕等。生物的行为包括新陈代谢，遗传、繁殖、变异、进化或退化，等等。地质作用可分为以下三个层次：(1) 基本地质作用，如熔融、结晶、重结晶、沉积、地震、火山等。(2) 大地构造作用，如裂谷、俯冲、碰撞造山等。(3) 全球地质作用，如大陆增生、超级大陆会聚与裂解等。地球的行为包括这三个层次各种地质作用过程。大地构造物理学主要研究第二个层次的大地构造作用，并把它们作为了解全球地质作用的基础。

属性指研究对象的特征“基因”，包括生成时带来的组构特征和成长期发育的新的特性。相态主要指研究对象所处的运动状态。系统宏观的观察以秩序为出发点，所以相态可分为稳态或常态、似稳态、临界及混沌等。

地球的结构在地球物理学的教科书中已有详细的阐述，笔者在 1.2.1 节也将简述。有意思的是，在宇宙、地球和生命三大自然巨系统中，宇宙系的空间在不断地向外膨胀；生命系在时间上是不可逆的，在不断地向高级生物演化；而地球在时间和空间的尺度上都可能是有限的，既不会在空间上扩张，也将会随时间推移而老化。它们虽然具有各自的特点，但都是演化了几十亿年（甚至 $160 \times 10^8 \text{a}$ ）的自然巨系统，都有足够的内能以维持它们在漫长历史中的演化。固体地球是一个不对称系统：2/3 的大陆位于北半球，因此地热场相对于赤道也不对称，南半球地热流远高于北半球。如果把赤道旋转 90° ，就会有极不对称的大陆半球和太平洋半球，导致洋流不对称和地磁场的非完全补偿。大陆平均高度 600m，大洋平均深度 4400m，这导致水平热梯度的产生，并促进洋脊扩张和洋下地幔物质向大陆方向的转移，说明结构的非对称可以诱发大地构造作用，改变地球的行为。大陆有较轻的花岗质地壳，而大洋没有，说明大陆与大洋内部结构不相同。地球表层的这种高度的不均匀性暗示着深层也存在不均匀性。实际上，太平洋岩石圈的独特性根源可追溯到核幔边界。地球内部结构与其形成演化是装在一根轴上的两个轮子：结构的不均衡造成物质与能量的运动，而物质与能量的运动又反过来改变结构。举例说，多数地质学家认为地球上的大洋形成先于大陆。但是也有人提出，中太古代以前地球的结构与现今不同，当时有两个液体圈层：下液体圈层（外核）和上液体圈层。在受多次宇宙星体撞击之后，上液体圈层的盖层被打破使液体大量涌向地表，在 $27 \times 10^8 \text{a}$ 前形成了接近现今规模的海洋。如果这个假说是对的，那么板块构造说便不适用于 $27 \times 10^8 \text{a}$ 以前的地球地质历史。当然，还有不少地质学家认为板块运动在 $27 \times 10^8 \text{a}$ 以前的太古代就发生了，他们也有许多依据 (Fountain, et al., 1992; Fowler, 1993)。

目前，有一些学者把地球的圈层当作地球系统的组元，如图 1.4 所示。这种把地球的准圈层结构当作组元的视角与系统理论不符，因为系统所有组元都有相互作用，而上述模型不能体现不相连组元的相互作用。笔者在本书提出的系统组元相互作用如图 1.5 所示，对此模型的讨论将在 1.1.5 节进行。

经典地质学的一个佯谬是关于郝屯的均变论 (Uniformitarianism) 和“将今证古”的方法论。普莱弗尔和莱伊尔把地质学的均一性原理解释为：“在地球的一切演变过程中，自然法则是始终一致的；她的各种规律是唯一有制约常见运动能力的东西。河流与岩石、海洋和大陆都经过各种变化，但是指导那些变化的规律以及它们所服从的法则始终是相同的”。

因此,根据现代地质作用的观测便可以解释地球过去的演化。这种观点用于显生宙以来的地质演化是没有问题的。但是上面已经讨论过,在 $27 \times 10^8 \text{a}$ 前大陆仍在萌芽阶段时其地质作用的机制与现代板块运动机制必定有很大的区别,而在整个 $46 \times 10^8 \text{a}$ 地球演化的历史中经历过多次的突变,无论从全球尺度还是从区域尺度看都不宜直接把现代地质作用的模式不作修正地推向突变以前的地质历史。如果我们承认均变论关于演化法则始终一致的“原理”,就意味着板块构造学说并不是“指导那些变化的规律和它们所服从的法则”。反之,

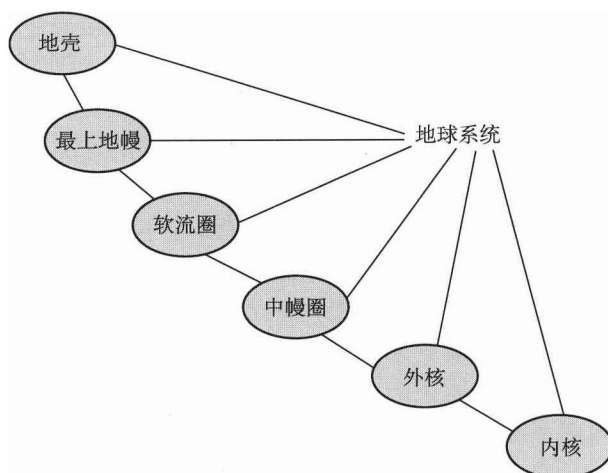


图 1.4 关于地球内部系统的一种假说及其系统组元

如果我们认为板块构造学说是这种“规律”或“法则”,人们就会怀疑均变论及将今证古的方法。其实,均变论与板块构造学说都在一定范围内与地质资料符合,在一定的初始一边界条件下适用,只不过我们对有关初始一边界条件还不够明确而已。

经典地质学的第二个悖论是从经典物理学上带过来的。无论牛顿还是爱因斯坦,都认为因果律是自然的主宰。经典地质学也认为所有地质作用都遵循因果律,是决定性的。例如,岩浆岩是岩浆冷却的结果,而岩浆活动为热力

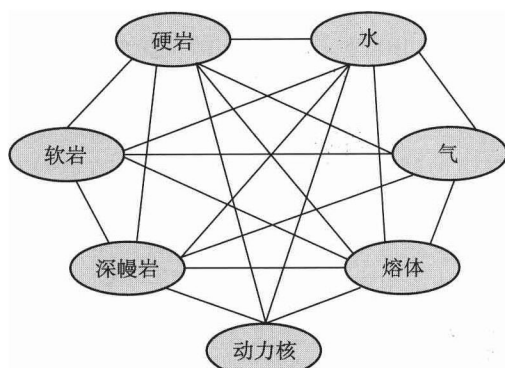


图 1.5 地球内部系统的模型与系统组元

所驱动;沉积岩是在重力作用下岩石经侵蚀、风化与运移沉积形成的;变质岩是由于温压升高使矿物重结晶的结果等。这些认识有很多观测资料作佐证,但是远远没有揭示地球内部地质作用过程的极端复杂性(见 1.4 节)。以花岗岩为例,可以有壳内重熔、来自地幔、由洋壳俯冲分异产生等多种来源,结果同为形成上地壳花岗岩。根据混沌理论,当地球系统处于远离平衡的体制时,变化的可能性非常多,一对一的因果律可能会被打破,各种地质作用可能相互反馈而形成某些具有高度自组织的结构,呈现出许多种有序行为的可能性。以陆内地震为例,既不是因为断裂发展才出现地震,也不是因为地震发生才有断裂,而是在地应力分布远离平衡状态下地壳震动与断裂发展相互驱动,同时发展出陆内地震和具有高度自组织的断裂系统。这种断裂系统在空间上是分形的,分维数约为 1.73。科学家不应站在人类社会的立场上把地震视为毁灭“地球”的暴力;而应从地球系统的角度看到,地震是地球系统调节自身的平衡必须进行的自组织行为,因为通过地震可使区域地应力分布从远离平衡的状态回到准平衡状态。大量事实证明,自然中有一种自发产生新物质的现象,自发就是无因,是多种作用的相互驱动和天然的自组织,如行星起源和生命起源这一类现象是无法用因果关系完满解释的。总之,不要为一对一的因果律所束缚,不要认为一种作