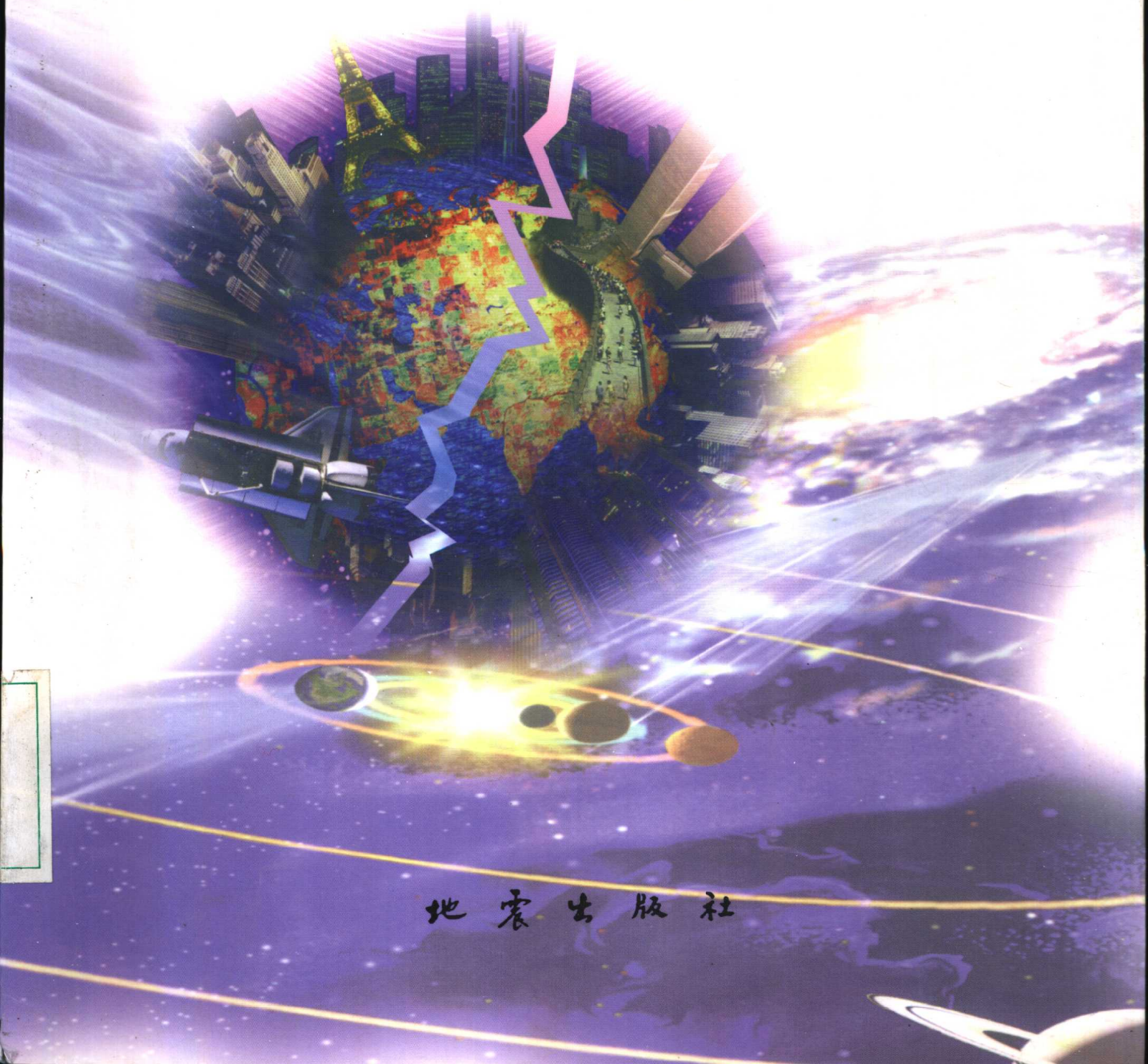


EARTHQUAKES AND GEOLOGICAL DISCOVERY

地震九讲

[美] Bruce A. Bolt 著



地震出版社

EARTHQUAKES AND GEOLOGICAL DISCOVERY

地震九讲

[美] Bruce A. Bolt 著

马杏垣等 译

石耀霖等 校

地震出版社

2 0 0 0

著作权合同登记 图字: 01 - 1999 - 1344

EARTHQUAKES AND GEOLOGICAL DISCOVERY

[美] Bruce A. Bolt

本书版权归 Scientific American Library

Copyright © by Scientific American Library 1993

本书中文版由著作权人授权地震出版社独家出版发行, 2000

版权所有, 翻印必究。

地震九讲

[美] Bruce A. Bolt 著

马杏垣 吴 刚 余家傲 石 芃 译

石耀霖 马 丽 谭先锋 校

责任编辑: 余 英 吴 冰

责任校对: 王花芝

*

地震出版社 出版

北京民族学院南路9号 邮编: 100081

北京地大彩印厂印刷

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 11.25 印张 1 插页 288 千字

2000 年 4 月第一版 2000 年 4 月第一次印刷

印数 0001 - 2000

ISBN 7 - 5028 - 1702 - 6/P·1021

(2198) 定价: 20.00 元

校者的话

地震，这两个字是多么震撼人心。对多数人来说，地震不过是电视或报纸上的新闻，似乎离自己还很遥远。但对我国京津、河北、川滇、新疆、甘肃等地震活跃地区的许多居民，地震却是一种现实的切身体验，甚至是出生入死的亲历险境。

中年以上的人都还记得，在“四人帮”灭亡前最后疯狂的1976年，7月28日发生了唐山7.8级地震，造成24万人死亡。校者写此前言前3天，我国台湾省又发生了7.6级地震，被李登辉“两国论”困扰的台湾同胞，又遭遇了台湾近百年来破坏最大的地震灾害。

人祸天灾，接踵而至，一些人也许真要相信天人感应的迷信了吧？可是，科学家的研究告诉人们，地震是一种自然现象。本书是美国伯克利加州大学的布鲁斯·博尔特教授为著名的《科学美国人》系列图书所写的一本科普读物。它介绍有关地震现象、成因、预报和减灾等方面的基本知识，以及人们利用地震波研究地球内部构造的最新方法和成果。它既是一般读者很好的通俗读物，也是专业地震工作人员全面了解地震学最新进展的有价值的参考书。

地震预报和工程防震，是我们抗震减灾的两个主要方面。校者和博尔特长期交往中了解，他思想上是更侧重防震工程的，但在本书中也对地震预报作了客观的叙述。该书英文版发表以来，国际地震界曾经有过地震究竟能否预报的辩论，我国新闻媒体也有所报道。作为世界上惟一设有国家地震局进行地震预

报的国家，我国地震预报的水平究竟怎样？

地震预报有长期、中期、短期和临震预报之分。就年度预报来说，近十年来，我国预报台网监视区内每年平均发生 5 级以上地震略大于 12 次，每年年度预报面积平均占全部监视面积的 8%，平均成功预报的地震略高于 3 次。如果完全随机的猜测，取得同样或更好预报成绩的概率小于 5%。由于地震往往发生在地震活动区，如果随机预报时报到高活动区的机会相应成比例地增大，这种基于背景地震活动性的随机预报取得与实际预报相同或更好成绩的概率为 35%。因此可以说，对于世界尚未解决的地震预报这样一个难题，我国取得了一定成绩，基于 30 年经验的预报显著优于随机猜测，但预报水平也还不高，提高地震预报的科学水平仍然是迫切和艰巨的任务。

30 年前，当板块构造学说刚传入我国时，傅承义院士写过一本《地球十讲》的小册子，曾经产生了巨大的影响。今天，马杏垣院士亲自领导并参加翻译了这本《地震九讲》，一定也会使读者得到丰硕的收获。

本书第 1、2、4、5、6 章由马杏垣院士译，第 3、7 章由吴刚译，第 8 章由余家傲译，第 9 章由石芃译。由石耀霖、马丽和谭先锋校对。本书得到地震联合基金会和中国地震局的支持，仅表谢意。

石耀霖

1999 年中秋

前 言

当地震袭击时，逃向竹林。

——日本谚语

作为一名教师讲授地震学 30 多年，使我有机会接触到许多听众。我的希望之一是使人们最终能理解：地震之所以危险，主要是因为我们没有对它的后果采取适当的预防措施。大量事实有力地证明，当认真对待和严肃防备时，地震造成的生命伤亡和财产损失就能够大大地缩小，甚至在发生大地震时也不例外。这种信念由于联合国审议并通过了“国际减轻自然灾害十年”这个决议而传播得更强劲了。

然而，地震学的研究内容远远超出预防地震危险这一方面，它对整个地质学发展史中一些最基本的发现作出了关键性的贡献。例如本世纪的地震观测曾对全球构造运动提供了基本信息，诸如山脉的建造和大陆的运动。地震记录还揭露了地球内部的奥秘，特别是其岩石的构造和它们的弹性特征。地震观测甚至还对地球整个内部的化学组成和动力学演化提供了线索。现代技术，特别是高速计算机的应用，正在以日益加快的步伐和精细程度提供这些地震信息。

有的读者可能充满了好奇，地震记录不过是一条条曲线，地震学家怎样就能从它们对遥远深部的有关地球特性的基本问题作出回答呢？本书就是献给这些读者的。地震对许多重要的地质工作起了关键作用，虽然本书不可能包括所有这些内容，然而书中讨论的震例和地球物理研究，揭示了地震学广泛的科学成就及其现实意义，应该能满足好奇的读者。我也希望通过此书表达出地质科

学的发现过程，这是多么激动人心呀！科学探索的创造精神在我们对这个星球的物理知识的探索中得到了最好的体现。

作为一门定量观测科学，地震学从上世纪的小规模研究开始，现今已成长为一项大的事业。它应用于地质和地球物理探测、石油工业中的地震勘察、地质工程公司和政府所属研究部门的震灾评估，以及土地利用规划，包括关键设施，如核电站、大坝和桥梁等的选址。上个世纪的简单的机械地震仪已让位于现今使用的精巧灵敏的数字化地震仪。

我曾有幸认识不少地震学科的先驱，包括贝尼奥夫（Benioff）教授、布伦（Bullen）教授、拜尔利（Byerly）教授、尤文（Ewing）教授、古登堡（Gutenberg）教授、杰弗里斯（Jeffreys）爵士、莱曼（Lehmann）博士和里希特（Richter）教授等，他们现在都已过世。我于1949年开始学习地震学，当时澳大利亚悉尼大学应用数学教授布伦指导我的博士论文，他建议我对当时假定存在的环绕地球内核的过渡层进行深入的理论研究。这种研究要把数学应用于地震测量而实现地质遥测，在我于1963年到伯克利加利福尼亚大学作地震学教授之后，我的研究演化成更直接的实际追求。我的工程和地质同事们期望我回答的不是6000千米深部地心的性质，而是在加利福尼亚和其他地震区发生地震的前景。当我不得不告诉他们，这似乎很简单的问题但并无可靠的答案时，他们似乎大吃一惊。虽然至今有的问题仍没有答案，有幸的是在过去30年里，我们看到了预测强地面运动的地质学基础研究已有很大进展，这种知识已被应用于抗震结构设计和土地开发区划。

在编写本书的过程中我得到许多人的帮助，受过加利福尼亚地震界许多朋友的恩惠，我至今还作为有关地震危险的咨询专家和他们一起继续工作。有几位同事和学生审阅或评述了部分书稿，我感谢他们，特别是亚伯拉罕森（Abrahamson）、贝克尔（Becker）、戴林格（Dehlinger）、杜威（Dewey）、格雷戈尔（Gregor）、利泰塞（Litchiser）、洛马克斯（Lomax）、谷本（Tanimoto）、塔克（Tucker）、蔡义本（Tsai）和尤迪亚斯（Udias）对本书内容的宝贵帮助。

许多同事建议并提供了精彩插图，遗憾的是限于篇幅只好精选，我的妻子贝弗利（Beverley）认真地帮助我查错并编制索引。伯克利加利福尼亚州立大学的地震工程研究中心的克莱尔·约翰逊（Claire Johnson）在百忙中为本书做文字

处理。我还要感谢在弗瑞曼公司的《科学美国人》丛书的工作人员。编辑苏珊·莫兰（Susan Moran）和我一起对主题内容钻研很深并做了许多改进。我愉快地和阿莫斯（Amos）一起寻找富有启发性的彩色照片，他的艺术发现令人欣慰。

布鲁斯·A·博尔特

（地震学教授）

1993 年 3 月



根据日本民间传说，驮着大地的大鲶鱼晃动身体时就造成地震
这幅 1855 年的木刻画所描绘的是：上帝命令他的大臣惩罚造成
东京地震的鲶鱼，以杀一儆百，其他鲶鱼代表其余各次大地震

目 录

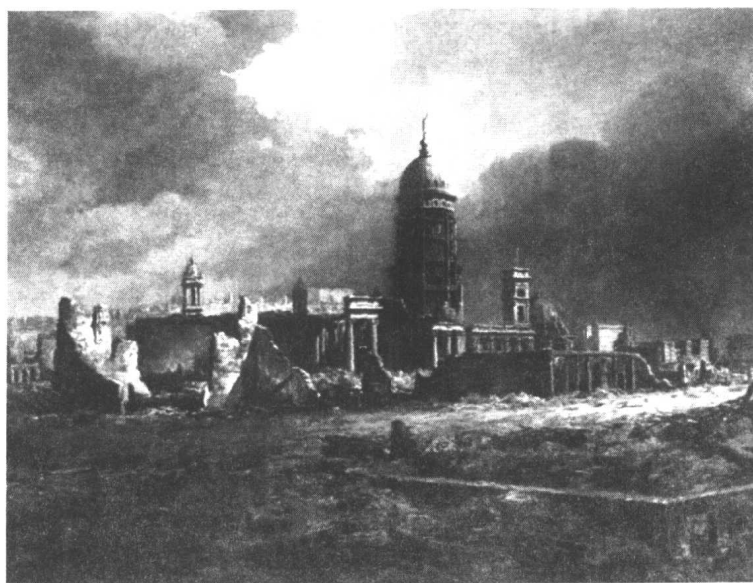
第 1 章 地震学的起源	(1)
1.1 早期的地震记录	(2)
1.2 早期希腊的概念	(3)
1.3 现代的启蒙	(5)
1.4 罗伯特·马莱 (Robert Mallet) 和 1857 年意大利的大地震	(7)
1.5 两个关键地震	(9)
1.6 1906 年旧金山地震的贡献	(11)
1.7 1923 年日本地震	(15)
1.8 现今的地震学	(18)
第 2 章 地震波	(20)
2.1 地震纵波和横波	(21)
2.2 波的性质	(23)
2.3 P 波和 S 波的速度	(25)
2.4 地质构造对地震波的影响	(25)
2.5 地球的地震共振	(28)
2.6 地震面波——沿地面的地震波	(30)
2.7 地震波的波序	(31)
第 3 章 地震的仪器监测	(34)
3.1 张衡的候风地动仪	(35)
3.2 现代地震仪的诞生	(36)
3.3 地震观测台	(38)

3.4	地震的全球分布	(41)
3.5	地震定位	(43)
3.6	确定地震的大小	(46)
3.7	地面震动的其他测量方法	(49)
3.8	强震加速度	(51)
第 4 章	地震的产生	(53)
4.1	地质断层	(54)
4.2	其他来源的地震动	(56)
4.3	弹性能的缓慢积累	(58)
4.4	弹性回跳原理	(59)
4.5	40 年中美国的最大地震	(61)
4.6	地震矩	(64)
4.7	一条断层破裂的过程	(64)
4.8	著名的帕考义马水坝加速度仪	(66)
4.9	深源地震	(67)
4.10	区分非自然与自然地震	(70)
4.11	有限禁止核试验条约	(70)
4.12	识别的线索	(72)
第 5 章	地壳与板块	(74)
5.1	地壳的概念	(75)
5.2	探索地壳	(77)
5.3	大洋和大陆的差别	(80)
5.4	大陆漂移	(82)
5.5	板块构造原理	(84)
5.6	沿板块边缘的地震机制	(87)
5.7	构造板块和火山分布	(89)
5.8	1990 年菲律宾断层破裂	(89)
5.9	板内地震	(91)
5.10	地震带中的平静空区	(92)
5.11	板块边缘地震的灾害	(94)
第 6 章	地球内部的图像	(96)
6.1	解释穿过地球内部的波	(99)
6.2	不同波的名称	(100)
6.3	地震波的走时	(102)

6.4	地球液体核的发现	(104)
6.5	地球内核的发现	(106)
6.6	来自地核的回波	(108)
6.7	反演问题	(110)
6.8	地球的振荡	(112)
6.9	地球内部三维影像	(113)
6.10	地幔的对流运动	(115)
第 7 章	预测强地面运动	(117)
7.1	绘制地震烈度图	(118)
7.2	描述地震动	(119)
7.3	解释较复杂地震波的到来	(122)
7.4	现代地震望远镜——地震仪组合	(122)
7.5	决定强地面震动的因素	(125)
7.6	“世界锦标”地震	(127)
7.7	滨海区的震灾	(131)
7.8	远距离作用：1985 年墨西哥地震	(133)
7.9	合成地震图	(136)
第 8 章	地震预报	(139)
8.1	中国和日本的 earthquake 预报经验	(143)
8.2	前兆证据	(146)
8.3	古地震学	(147)
8.4	卡斯凯迪亚俯冲带	(150)
8.5	计算地震发生的概率	(154)
8.6	帕克菲尔德地震预报实验	(157)
8.7	地震预报的后果	(158)
第 9 章	减小地震风险	(159)
9.1	对一个小国的致命一击：1988 年亚美尼亚地震	(162)
9.2	可以承受的地震风险	(163)

第 1 章

地震学的起源



艺术家对旧金山市政厅于 1906 年地震和大火灾后惨状的描绘

在过去的 500 年里，700 多万人死于地震，还有数百万人眼巴巴地看着自己的生活来源和地方经济被摧毁。灾难性地震对于日益增长的世界人口来说已成为头等重要的问题之一，驱动着科学家和工程师们去研究它。然而，地震已被证明它不仅是破坏之源，而且也是地质知识之源。对地震波的分析，为地质学家提供了详细的、常常是独一无二的有关地球的信息。研究地震的性质和探索地球的组成及动力学过程两者同时并进。

地震学，即对地震的科学研究，与化学、物理学或地质学相比较，它是一个年轻的学科；然而仅在 100 年里它在解释地震成因、地震波的性质、地震强度的显著变化以及整个地球的地震活动明显的分区特征（图 1.1）等方面取得了显著进步。虽然地震学仅在上一世纪才被公认为是一独立研究领域，然而人们推测地震的成因已有上千年历史。当对这些自然事件早期的迷信让位于较科学的分析时，无情的大地震序列激发了人们对地动原因的缜密思考，直到本世纪早期科学家们才获得了对强烈地动直接来源的现代理解。

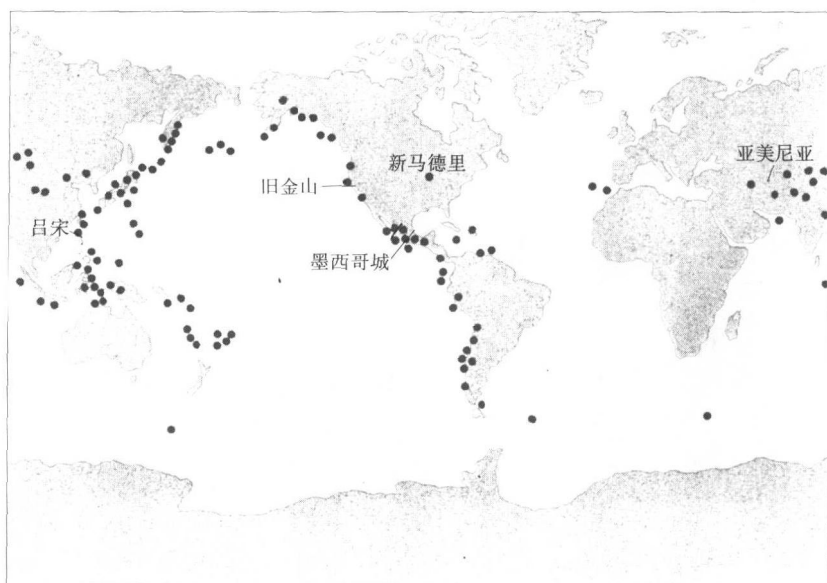


图 1.1 1987—1992 年全球大地震震中分布图

1.1 早期的地震记录

地球在整个地质时期都经受过地震，文字记载可追溯到过去的几千年。在中国，学者们曾从很早以前的历代王朝文献、文学作品及其他来源得到地震证据。最早的可追溯到公元前 1831 年的山东省地震，该记载仅提到“泰山震”，但从公元前 780 年起中国北部的地震记载就已经相当完整了。

这些历史记载如此之详细，以致现代研究者根据它们可了解当时破坏的分布情况，从而得出地震的大小。例如，1679 年 9 月 2 日的三河地震，是北京附近的最大地震，在 121 个

州府县志中都有记载。当现代的研究者们把建筑物破坏、地裂缝和近震源的其他地质现象以及从远处传来的地面摇动的报告与现今地震进行比较时，他们得出结论，认为该地震大小与1906年美国旧金山地震相似。

尽管中国学者们对地震有详细记载，但是他们对灾难性地动的原因并未达到真知。占主导的想法是把地震与其他自然灾害联系起来，诸如洪水、干旱和瘟疫等，并从超自然的关系中寻求原因。

在古代世界很多地震区人民对地震都有宗教性的解释。对古代地震的许多引喻可在《圣经》和当时其他宗教著述中见到。一些显著的事件，诸如杰里科城墙的倒塌和红海的开裂，曾被那些不迷信超自然事件的人解释为是地震的结果。泽长赖亚（Zechariah）的书中甚至有一节对地震成因——岩石错动的卓越描述：“橄榄山将从中间劈开，一半向东，另一半向西，那里将出现一个大谷；山的一半将向北移，另一半向南移动。”

这一段文章所提示的岩石滑动和地震之间的物理联系直至20世纪末才被人们理解，但是很早以前古希腊人已经对地震成因的物理学理解迈出了第一步。

1.2 早期希腊的概念

地中海及其周边国家的地震活动性是很高的，对地震作出自然解释的首次尝试就发生在那里。早在希腊科学发展的早期，其实践者已开始考虑用地震的物理原因取代民间传说和神话提示的神学原因。最早的希腊科学著作作者之一是萨勒斯（公元前580年），他以对磁性的讨论而出名。他的故乡在的米勒特岛，在那里，海的破坏力给他很深的印象，他相信地球是漂在海洋上的，水的运动造成地震。相反，约于公元前526年逝世的安乃克西门内斯（Anaximenes）认为地球的岩石是震动的原因。当岩体在地球内部落下时，它们将碰撞其他岩石，产生震动。另外一个学派的安那克隆高拉斯（Anaxagoras）（公元前428年）认为火，至少是一些地震的部分原因。

然而这些大胆的希腊解释中没有一个是地震成因的全面原理。第一个这样的论述是由希腊学者亚里士多德（Aristotle）（公元前384～322年）发起的。其论著的重要性在于：他不是从宗教或占星术中寻找解释，诸如地震是由行星或彗星联合而产生的，相反，他注重当时的务实背景。他讨论地震的成因，首先与常见的大气事件类比，诸如雷和闪电；其次与从地球升起的蒸汽和火山活动相联系（图1.2）。像他的许多同时代人一样，亚里士多德确信地球内有一“中心火”，虽然希腊思想家对其原因存在异议。亚里士多德原理认为地下洞穴将像暴风雨云造成闪电一样产生火。这股火将快速上升，如遇阻，将强烈爆发穿过围岩，引起震动和声响。后来对这一理论的修正认为，地下火将烧掉地球外部的支护，跟着发生的洞顶坍塌将导致像地震一样的震动。亚里士多德把地震和大气事件联系起来以及它的火和烟气引起地下地震的观点虽然不正确，但直至18世纪曾广泛地被接受。

对于地面震动的物理解释中重要的一步是，亚里士多德根据它们对建筑物的震动主要是垂向的还是横向的，以及是否伴有气体逸漏，把地震划分为不同的类型。在亚里士多德所著的《气象学》中，他解释了多种不同类型的自然现象，如“下层土松散的地方摇动剧烈，因为它们吸引大量的风”。

塞尼卡（Seneca）（公元前4年至公元65年）在其著作《自然界的问题》中提出他自己的地震成因解释，其原理与他前辈的原理相反。他的著作部分地受到意大利公元63年大地

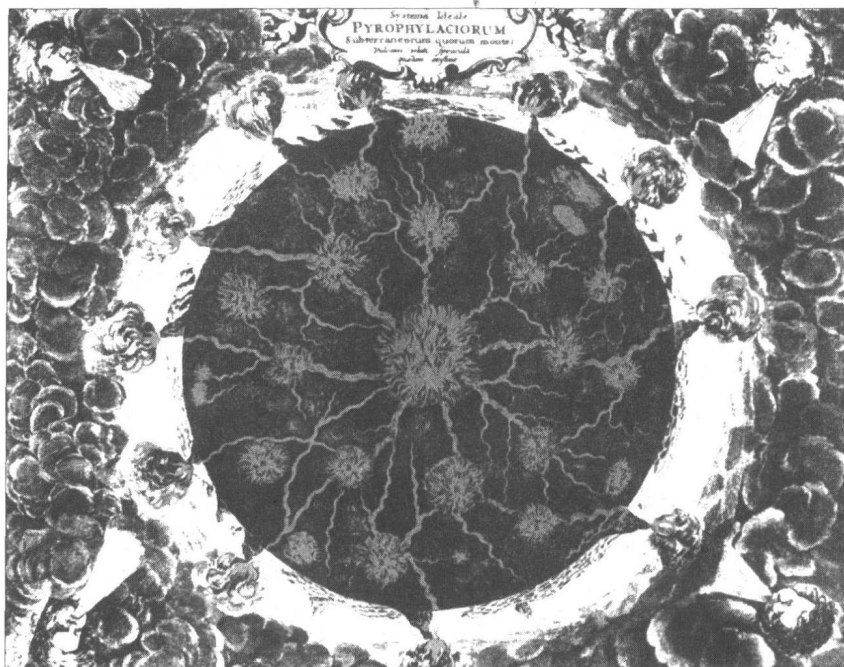


图 1.2 人们对地球内部的早期想象

1678 年左右科齐尔 (Kircher) 认为地球是有许多裂隙的固体球, 岩浆和爆发性气体通过管道涌到地表火山口



图 1.3 赫尔曼·高尔 (Herman Galt) 的木刻画

该画描绘 1556 年在君士坦丁堡看到的一颗彗星, 被说成是预示两个地震的异兆

震的启示。塞尼卡推测震动是空气寻路钻入地下通道的结果。当空气受压缩时，产生强风暴，当它们破土而出抵达地面时造成广泛的破坏。

所有希腊人的解释都缺少产生地震所需要的能量的机械力的理论概念。希腊科学研究的优点在于实践者们有好奇心，它引导他们去研究地震分类和成因推测。其弱点是缺乏实验和应用仪器对自然现象作定量的观察。

1.3 现代的后蒙

通过木板印刷的有关艺术家们印象和日记、书信及旅行日志中的记载，给我们提供了许多建筑物毁坏的记录。但是几个世纪过去了，对地质构造运动和地震的关系的理解是缓慢的。由于地质学严重缺乏物理学原理解释而闭塞停顿。18世纪在伊萨克·牛顿爵士有关波和力学著述的强烈影响下，一个新的时代开始了。牛顿的《数学原理》终于提出了能够统一解释地球上所有的运动，包括地震运动的公式。他的运动定律提供了解释地震波所需要的物理学原理，他的重力作用原理为理解造成地球形状的地质作用力提供了基础。他有关地球潮汐的极有见地的议论：“海的涨潮和落潮是由太阳和月亮的（引力的）作用引起的”，清楚地表明他的工作促成的巨大进展。

然而，古代把地震归因于超自然原因的迷信很难逝去。甚至到1750年一位作者在伦敦皇家学会的哲学汇报中提出“向那些对地震作自然解释而被冒犯的人”道歉。

18世纪中期在牛顿力学影响下的科学家和工程师开始发表研究报告，把地震和穿过地球岩石的波联系起来。这些研究报告很重视地震的地质效应，包括山崩、地面运动、海平面变化和建筑物毁坏。例如有人像希腊人一样注意到软地基上的建筑物比硬地基上的破坏厉害。有兴趣的人们开始保存并定期公布地震事件，1840年冯霍夫（Von Hoff）首次发表全世界的地震目录。

甚至当欧洲进入理性时代，科学探索迅速发展的时候，地震仍然往往被归之为超自然原因或仍沿用很早以前希腊学者们所假设的原因。这种对古老原理的依附可以在下面例子中看得很清楚。1750年伦敦被地震摇动了几次，因而被文人们称为“地震之年”。2月8日人们因窗户作响，家具摇晃跑到街上去了。一个月后一个更强烈的震动，使烟囱掉下，建筑物倒塌，教堂钟摇晃。这些事件促使学者向伦敦皇家学会提交50多篇文章。

这些论文之一，题为《地震成因的一些考虑》，其作者是哈尔斯（Hales），他活跃于教会事务，并与在美洲建立佐治亚殖民地的委托管理人有联系。1727年他发表了《植物统计》，是自牛顿的《光学》之后在欧洲发表最早的科学著作，此著作成为“树液在植物中流动”这一模型的奠基石。哈尔斯是一个勇敢和快乐的实验者，他的生动描述都是对牛顿的赞颂。他以自述方式描写1750年3月6日的地震：

“我在伦敦的一层住室被震醒，很敏感地觉得床在起伏，地面必然也在起伏。在房子里有含糊的突发噪音，最终空气里传来像小炮一样的大声爆炸声，从地震开始到结束有3~4秒时间。”

哈尔斯关于伦敦地震原因的观点与许多世纪以前经典哲学家所表述的观点是相似的：“我们发现，在伦敦最近的地震中，地震发生前空气往往是平静的，天上出现黑色硫磺云，如果有风，这云可能像雾一样散开，而其扩散可以阻止地震。因为地震可能是由于这种硫磺云内爆发性闪电引起的。硫蒸气平时慢慢地从地球内部上升出来，当涌出量特别大时，可能