

地震监测——

人类认识地震奥秘 的金钥匙

张晓东 张晁军 王中平
王 博 闫 伟 卢 显

著

知识出版社

地震监测—— 人类认识地震奥秘的金钥匙

张晓东、张晁军、王中平、王博、闫伟、卢显 著

知识出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震监测 : 人类认识地震奥秘的金钥匙 / 张晓东等著. — 北京: 知识出版社, 2012.10

ISBN 978-7-5015-6939-7

I. ①地… II. ①张… III. ①地震监测 IV. ① P315.73

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第231136 号

作 者: 张晓东、张晁军、王中平、王博、闫伟、卢显

责任编辑: 徐世新

出版发行: 知识出版社

地 址: 北京阜成门北大街17号 邮编: 100037

网 址: <http://www.ecph.com.cn> Tel: 010-88390718

图文制作: 北京华艺创世印刷设计有限公司

印 刷: 北京旺都印务有限公司

印 数: 1—5000册

印 张: 11.5

字 数: 180千字

开 本: 720×1020 1/16

版 次: 2012年10月第1版

印 次: 2012年10月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5015-6939-7

定 价: 29.8元

前 言

地震是全人类面临的巨大突发性灾害,严重威胁着人类的生存安全和经济发展。进入 21 世纪以来,全球巨大灾害性地震频繁发生,仅 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊 9.0 级巨大地震海啸、2005 年 10 月 8 日巴基斯坦 7.8 级特大灾害性地震、2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级特大灾害性地震、2010 年 1 月 13 日海地 7.3 级巨大灾害性地震以及 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级巨大地震海啸,就造成 80 万人死亡,经济损失更是难以估算。在科学技术十分发达的今天,地震灾害给人类带来了巨大的挑战。

人类绝对不会面对今天巨大的地震灾难而听天由命、坐以待毙,最艰难的时刻就是黎明前的黑暗,地震科学大的发展就在我们面前。1906 年 4 月 18 日旧金山 8.3 级大地震、1923 年 9 月 1 日东京 8.2 级大地震的发生,促使地震成因研究中弹性回跳理论大发展,促进了地震波的分析,推动全球地震仪器观测网的建立。上世纪中叶,又有一系列大地震袭击人类,60 年代初期,全球大地震陆续在一些大城市及附近发生,造成了程度不等的严重破坏,引起有关国家政府和科学家对地震问题的重视。1964 年 3 月 28 日,美国阿拉斯加发生 8.3、8.5 级大地震,1964 年 5 月 16 日,在日本新泻发生 7.4 级大地震,1965 年日本松代强震群活动产生了巨大影响,在这种背景下日本提出第一个地震预报五年计划(1965 ~ 1969 年),美国提出“地震预报与地震工程的十年规划”,全世界地震研究进入一个空前的高潮阶段,而板块学说在这一时期开始大发展,赫斯(Hess)于 1962 年前后提出海底扩张说;1968 年板块构造学说创立。美国、日本、苏联、中国进行了大规模的地震探索与研究,出现了令世界关注的中国海城地震成功预报,出现了定量地震学等划时代的研究成果,使我们对巨大地震的孕育发生、地震前兆机理的认识发生根本性的变化。加之 GPS、数字地震技术的发展,使我们获得了以往根本得不到的形变场、地下介质和应力场的变化资料,这些将在地震科学研究,尤其是地震监测预报科学的发展中起到里程碑的作用。

当前地震学科中有一些突出的进展还是令人欣慰的，GPS 观测资料已经显示出，在巨大地震发生的区域，运动的形变量十分小，其周边的运动量要大得多，如果我们可以获得十分精细的地球表面的运动、应变动态图像，就可以判断哪些构造是被锁住的区域，将这些区域进行长期的观测和研究，将会对我们判断地震危险性随时间的变化有所帮助，也使我们在一定程度上预报地震成为可能。

本书作者从科普的角度，把历史作为一面镜子，从地震学、测震仪器入手，围绕形变、电磁、流体观测以及近些年发展很快的卫星观测等地震学科内容，插入一些图件和地震小知识，以及一些著名地震学家的生平和成就介绍，力图给读者以全方位的、纵深的地震学基础科普知识，立体直观地介绍地震监测技术和手段，在宣传普及地震监测预报科学知识的同时，提高社会公众的防震减灾意识，在突发性地震灾害面前给公众以有益的帮助。

本书是在中国地震局震害防御司的大力支持下完成的，他们一直关注着书中的内容和进展情况，并为本书的成稿提出许多有价值的建议，在此表示衷心的感谢。宋金、史海霞、杨志高、张小涛、杨文、解滔等一批年轻人为本书的出版也提出了许多有价值的修改意见。武玉霞女士一直利用其在地震科普和文字编辑方面的知识全力帮助我们，为本书的出版做出了贡献。我们借此由衷的感谢他们。

张晓东 张晁军 王中平
王 博 闫 伟 卢 显

MULU 目录

第一章 地震学的起源	1
一、古老哲学思想与早期的地震记录	2
二、地震神话——古代人们对地震的理解	5
三、自然哲学中的数学原理——近代地震认识的启蒙	7
四、最早的海啸记录和首次地震波计算	8
五、野外观测和人工地震学	10
六、旧金山大地震——美国地震学的兴起	12
七、1923 年日本地震：地震预报和大师的陨落	12
八、现今地震学	15
九、中国是地震灾害频发的国家	16
第二章 测震仪器与观测	26
一、地震仪器	27
1. 最早的地震仪——候风地震仪	27
2. 第二次世界大战之前地震仪的发展历程	27
3. 第二次世界大战后地震仪器的发展——现代地震仪	28
4. 20 世纪 80 年代以来地震仪器的发展——宽频地震仪，数字地震学的开始	29
5. 地震仪分类	30
二、地震观测	31
1. 观测点的环境	31
2. 建立观测台站	33
3. 地震观测台网	36
4. 地震台阵观测	39
5. 海底地震观测	40

MULU 目录

三、长周期地震仪与地球的自由振荡	41
四、地震定位	42
五、确定地震的大小	44
六、全球地震观测台网 (Global Seismographic Network)	45
七、近代地震观测与地球内部构造	47
八、冲浪国际地震网站	49
第三章 板块构造与地震	54
一、地球的结构	55
二、大陆漂移说	55
三、板块构造和全球地震分布	57
1. 板块构造	57
2. 全球地震分布	60
四、地震的发生	60
1. 地质断层	61
2. 地震成因的探讨——弹性回跳原理	62
五、地震的传播——地震波	66
1. 地震的纵波和横波	68
2. P 波和 S 波的速度	71
3. 地震面波——沿地面传播的地震波	72
六、地震发生在哪里——地震带中的平静空区	75
七、地震发生的强度	78
八、地震发生的时间	79
九、地震发生的几种现象和解释	80
第四章 地壳变形	82
一、概述	83

二、地壳运动观测·····	84
1. GPS 系统构成 ·····	84
2. GPS 观测基本原理与方法 ·····	85
3. 中国 GPS 观测现状 ·····	86
三、地应变观测·····	87
1. 洞体应变观测 ·····	87
2. 钻孔应变观测 ·····	89
四、地倾斜观测·····	91
1. 摆式倾斜仪器观测 ·····	93
2. 水管倾斜观测 ·····	94
五、跨断层测量·····	94
六、研究进展·····	95
第五章 地下电磁·····	100
一、地震的电磁异常现象·····	101
二、地球电磁学的发展——地震电磁学·····	102
三、地下电性结构的探测（地电阻率法）·····	104
1. 地电阻率法在地震监测中的应用 ·····	107
2. 中国地电阻率观测台网 ·····	108
四、探测地球的深部构造（地磁场观测）·····	110
中国地电场观测台网 ·····	113
五、空地电磁环境探测（地电场观测）·····	116
1. 地电场研究的对象 ·····	117
2. 中国地电场观测台网 ·····	118
六、电磁扰动观测 ·····	119
七、小结·····	121

MULU 目 录

第六章 水中望震	124
一、从观测端由说起	125
二、水的来源与地下水	126
三、流体观测台网	130
四、观测仪器研制与使用	134
五、震前变化信息	138
六、未来的路	142
第七章 飞天探地	144
一、卫星遥感观测	146
1. 遥感的物理概念	147
2. 海洋、资源和气象卫星	149
3. 地震灾害中的卫星遥感	152
4. 地震研究的新锐遥感技术	154
二、卫星电磁观测	155
1. 电磁的概念	155
2. 电磁理论的发展历史	155
3. 神秘电磁波	156
4. 地震电磁监测卫星	158
三、卫星重力观测	160
1. 卫星重力测量概述	160
2. 重力观测及地震预报	162
结 语	166
致 谢	166
注 释	167
参考文献	170

第一章



地震学的起源

地震学是一门相对年轻的学科。戴维森 (1927年)把记载1750年里斯本地震和约翰·马歇尔 (1724年~1793年)的工作确定为地震学的开始。地震学不仅作为一门研究地震成因的学科已开始发展,而且作为一种利用地震波分析来研究地球内部结构的方法也已开始发展。





一、古老哲学思想与早期的地震记录

地震贯穿着地球的整个地质时期，文字记载可追溯到过去的几千年。早在三千多年前，就有地震与天文因素关系的记载，据《竹书纪年》记载：“帝癸（一名桀）十年，五星错行，夜中陨星如雨，地震，伊、洛竭”。夏桀十年是公元前1809年，这个记载说明了由于星体的位置有了与平常不一致的变化，许多流星、陨石坠落，发生了地震，地震的后果是河流改道以及原来的河干涸。这个记载可能是世界上阐明天文现象与地震关系最早的文献。

古代中国人认为，地震是“阴阳失衡”所致，与人类，特别是帝王的行为有直接关系，是上天对人类的一种警告。汉成帝时议郎杜钦对此有过详细解释，《汉书·杜钦传》（卷60）记载：“臣闻日蚀、地震，阳微阴盛也。臣者，君之阴也；子者，父之阴也；妻者，夫之阴也。”这段把地震和日蚀联系在一起的记述，认为自然灾害是上天对人类的一种惩戒。“天诫论”是当时的普遍观点，凡发生灾异，皇帝会迅速颁布罪己诏，并举行祭天祭祖、大赦天下、问罪高官、更改年号等活动，实行改良朝政、任用贤良、减轻赋税等新政。

还有的把地震引发的一些现象当成一种信号来处理，认为它是上天显灵，要人行占卜。《晋书·冯跋载记》（卷125）记载：“传跋境地震山崩，洪光门鹳雀折。又地震，右寝坏。跋问闵尚曰：“比年屡有地动之变，卿可明言其故。”尚曰：“地，阴也，主庶民。震有左右，此震皆向右，臣惧庶民将西移。”地震中建筑物向右倒，便认为庶民将要向西方逃移，这显然是一种迷信。偏偏历史存在巧合，闵尚的话应验了。从现代的观点来看，老百姓由于地震西迁，是由当时客观环境决定的。

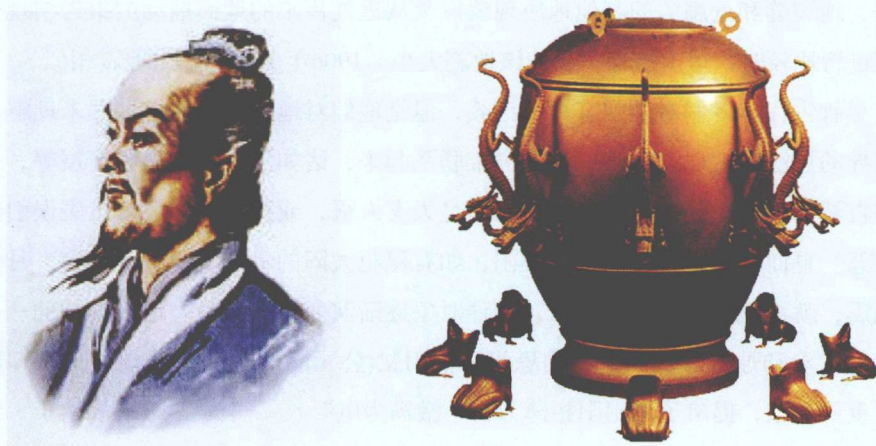
古代思想家庄子已注意到地震有周期性，他说“海水三岁一周。流波相薄，故地动”。把地震与海洋潮汐联系起来，说明古人对自然观察非常精细。到了东汉时代，杰出的科学家张衡于公元132年研制出世界上第一台地动仪，安置在河南洛阳。公元134年，张衡根据地动仪龙首吐丸的方位，向朝廷报告西北发生了地震。由于这次地震发生在600千米之外的甘肃的天水一带，京都洛阳并无震感，人们都很佩服地动仪的神妙。在那个时代，弹性波理论还没有出现，而张衡竟能想到地的震动可以传播很远，并且用物体惯性原理做成机械，以记录地面的振动，真是一个伟大的发明。张衡不仅利用悬挂物体的惯性原理完成了人类第一



次成功的测震实践，还使134年的陇西地震成为有史以来第一个被科学仪器所检测到的地震。张衡的这一开创性的研究思路和成功的科学实践，对19世纪末现代地震学的萌芽起步起到重要的思想启迪作用，成为现代测震学中广泛使用的摆式拾震器的科学原型。

在中国史书和地方志中还记录了一些地震前的异常现象，如1556年1月23日陕西华县8级大震前，“日光忽暗，有青黑紫色，月影如盘数十，相摩荡，渐向西北散没”。这段记载表明，地震前在太阳上发生了一些特殊的物理现象。在地震发生前7~8个小时有缓慢的地面运动发生，如华州志记载：“十二日晡时，觉地旋运，因而头晕”。此外，在地震前还有缓慢的长周期波动，例如《华州志》记载：“及夜半，月益无光，地仄立，苑树如数捕地，忽西南如万车惊突(大震)。”这种“地仄立”和“苑树如数捕地”的现象就是一种长周期运动，随后才发生地震。

史料中除记有日月星辰的位置、房屋建筑的破坏程度、抗震特点、地貌改造外，还有地声、地下水、动物、气象、生物、静电、溢气等等大量无以计数的异常现象。清初蒲松龄在《聊斋志异》中把他亲历的1668年郾城地震写成《地震》一文，记述了震前的地声异常：“忽闻有声如雷，自东南来，向西北去，众骇异，不解其故，俄而几案摆酒簸，酒杯倾覆，方知地震”。民间村镇更有石刻、



1.1 张衡及其创制的候风地动仪



碑文、题记等等的记载。

《地震》一文系统论述了地震的成因、过程、影响、分布等问题。文中写道“大凡地震皆由积气所致……积土之气不能纯一，闷郁既久，其势不得不奋”。在古代，“气”通常是指一种客观物质力量，这种力量在地下不均匀地积累，积累久了，就爆发出来，引起地震。文中还说：“既震之后，积气既发，断无再大震之理。而其气之复归于脉络者，升降之间犹小不能大顺，必至于安和通适，而后反其宁静之体，故大震之后，不时有动摇，此地气反元之证也。”这些说法与现在对余震的一般认识比较接近。文章还阐述了地震动效应与震源深度的关系，“其发始于一处，旁及四隅，凡在其东西南北皆知其所自也”。“阴阳迫而动于下，深则震虽微面所及者广；浅则震虽大面所及者近。广者千里而遥，近者百十里而止，适当其始发处，其至落瓦、倒垣、地裂、败宇，而方幅之内递以近远而差”。对于中国地震空间分布，文中说：“西北地方数十年内每有震动，而江浙绝无……然滨海之地，如台湾月辄数动”。现在看来，台湾确是中国地震活动最频繁的地区之一；甘肃、宁夏、青海、新疆等西北地区地震也相当多，江浙地区不能说绝无地震，但相对来说，确实较少。

这些历史记载如此之详细，以至于现代研究者根据这些记载可了解地震破坏的分布情况，从而得知地震的大小。例如，1679年9月2日的河北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。当现代的研究者当时把建筑物破坏、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，得出结论，认为该地震大小与1906年美国旧金山地震相似。

尽管古代学者们对地震有详细记载，但是他们对地震发生的机理并未理解。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，往往认为是天灾人祸，或认为是国家政策失误引起的天怒。夏商时代的古人只崇拜太阳，如有侵犯太阳的事情发生——日食、月食和地震，就视为中国灾难。后来，崇拜对象逐渐演变成日、月、地三位神仙——羲和、常羲和烛龙。西周末年的思想家伯阳父(公元前约8世纪)对地震的认知做出了重要贡献，提出了“阴阳相薄为雷，激扬为电”、“震为雷”(《淮南子·地形训》)的理念，对公元前780年陕西地震评价过：“夫天地之气，不失其序；若过其序，民乱之也。阳伏而不能出，阴迫而不能蒸，于是有地震。今三川皆



震，是阳失其所而镇阴也。阳失而在阴，川源必塞。源塞，国必亡(《国语·周语》)”。尽管伯阳父的观点并无任何实质性的地学内容，而且把自然现象与社会问题混为一谈，但历史的无奈在于，他根据“伊洛竭而夏亡，河竭而商亡”(即伊河、洛河枯竭，夏朝灭亡了；黄河枯竭，商朝灭亡了)，预言“山崩川竭，亡国之征也”(即岐山崩塌，泾、渭、洛河枯竭，预示西周也要灭亡)，竟然言中了。这种原始的从自然界中觅寻人间沧桑答案的想法，一直延续到汉代，使伯阳父的阴阳观点发展成为玄学，甚至影响至今，堪称千古。

古代史官的一个重要责任是把地震作为一种特定的灾异记入正史，于是诞生了观察地震宏观现象的学科——地震物象学。秦汉440年间所记录的地震事件已达120余次，发现了地震活动存在朔望期偏高的特点，导致地震和天象被联系在一起，诸如“五星错行，夜中星陨如雨，地震”，“日有食之，地震未央宫”，“日食地震”，“地震，客星犯月”，“织女有变，天纪为地震”，“出房心间，地动”，“朔，日有食之。夜，地震”等等。尽管绝大多数的观测站没有建设高耸的台体来“受天命、感地灵”，但中国人至今还把天文、气象、地震的观测站简称之“观象台”。

几千年持续下来，中国积累了全球唯一海量的历史地震文字记录，为现代的地震区划、宏观研究、统计分析提供了大量资料和地震安全性评价的原始数据。纵观中国历史地震记录，可发现中国地震科学史可分为原始认识、自然崇拜、感性认识和科学探索4个阶段。科学的不断进步是丰富历史资料的必要前提，见图1.2。

二、地震神话——古代人们对地震的理解

在远古时期，人们对地震发生的原因，常常借助于神灵的力量来解释。在中国，民间普遍流传着这样一种传说：地底下住着一大鳌鱼，时间长了，大鳌鱼就想翻一下身，只要大鳌鱼一翻身，大地便会颤动起来。有类似说法的国家，并不只有中国。例如，在古希腊的神话中，海神普舍顿就是地震的神。南美还流传着支撑世界的巨人身子一动，就引起地震的说法。古代日本认为，日本岛下面住着大鲶鱼，一旦鲶鱼不高兴了，只要将尾巴一扫，日本就要发生一次地震。古印



度人认为，地球是由站在大海龟背上的几头大象背负的，大象动一动就引起了地震。除此之外，埃及和蒙古也有关于地下住着动物在作怪的传说。

在古代，很多遭受地震灾害的人们对地震还有宗教性的解释，有许多引喻可在《圣经》和当时其他宗教著述中见到。一些著名的事件，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。在《地震九讲》中，作者引用了古人泽长赖亚（Zechariah）对地震成因的生动描述：

“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。”这里所说的岩石滑动和地震之间的物理联系直至20世纪末板块学说和断层理论的出现，才被人们理解，而很早以前古希腊人已经对地震成因有了一些物理学方面的理解。

古希腊科学家萨勒斯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。而公元前526年逝世的安乃克西门内斯却认为，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认为火至少是地震的部分原因。

古希腊学者亚里士多德(Aristotle)(公元前384~前322年)，首先把地震的成因与常见的气象事件进行类比，诸如雷和闪电；其次与从地球升起的蒸汽和火山活

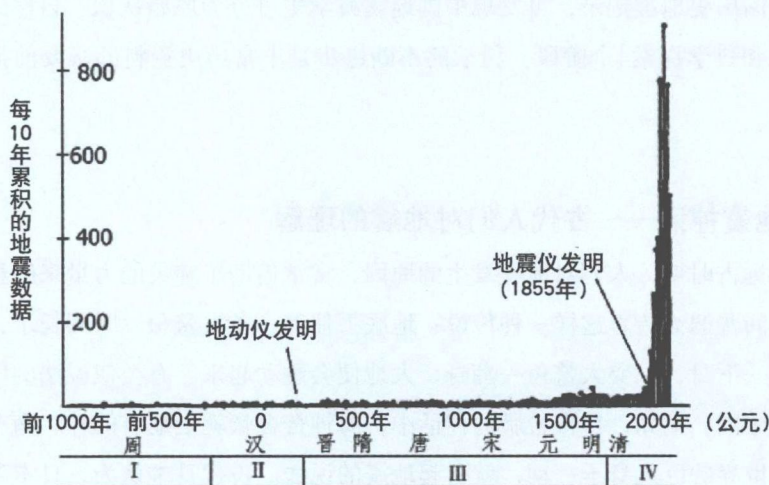


图1.2 中国历史地震的史料记录频度（每10年期间4.7级以上地震的累积数目）



动相联系。亚里士多德认为地下洞穴会像暴风雨云造成闪电一样产生火。这股火将快速上升，一旦遇阻，就将强烈爆发穿过围岩，引起震动和声响。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震的观点虽然不正确，但在18世纪之前这个观点曾被广泛地接受。

塞尼卡(Seneca)(公元前4年~公元65年)在其著作《自然界的问题》中提出他自己对地震成因的解释。与他前辈的相反，塞尼卡推测地震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。

古希腊人对地震的解释一般缺少产生地震所需能量的概念。但研究者的好奇心，引导他们去研究地震成因。遗憾的是他们缺乏实验和应用仪器对自然现象做定量的观测。

三、自然哲学中的数学原理——近代地震认识的启蒙

几个世纪过去了，人们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的解释而闭塞停顿。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《自然哲学中的数学原理》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。

牛顿在《自然哲学中的数学原理》一书之中综合阐述了物体运动三定律（加速度定律，惯性定律和作用与反作用定律），这三定律是用于解决万有引力定律的公式。这是牛顿在其才华巅峰时期所写的旷世巨著，是他个人智慧的伟大结晶。这部书，精辟地解答了牛顿之前几个世纪最有才智的人一直想解答却一直无法解答的问题。牛顿不但总结出了力学基本定律，而且还发现了证明这些定律的数学方法，奠定了数学描述宇宙活动的语言基础。在《自然哲学中的数学原理》出版之后，人类在自然科学中的伟大成就层出不穷，但这些成就无一不与这部非凡的著作直接相关。它的出现标志着经典力学体系的建立，是人类科学史，乃至整个人类文明史中的不朽巨著。《自然哲学中的数学原理》不仅影响自它面世后的300年里的自然科学领域，而且对人类的宇宙观也产生了深刻的影响，并因此形成了我们今天的“世界图像”。

这本书是几何学与力学的结合，是一种精确地提出问题并加以演示的科学，

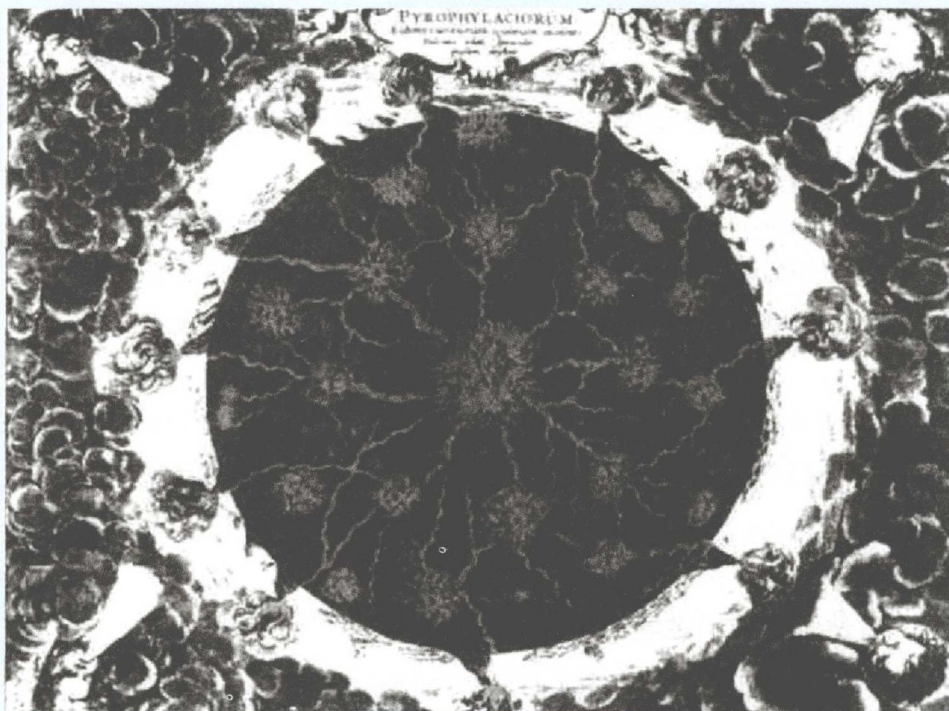


图1.3 人们对地球内部的早期想象（1678年左右科齐尔认为地球是有许多裂隙的固体球，岩浆和爆发性气体通过裂隙管道涌到地表火山口，这些观点对现在地下水的运移也有一定启示意义。）

旨在研究某种力所产生的运动，以及某种运动所需要的力，由运动现象去研究自然力，再由这些力去推演其他的运动现象。

他提出的运动定律提供了解释地震波所需要的物理学原理，他论证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理论论证了“海的涨潮和落潮是由太阳和月亮的(引力的)作用引起的”。

18世纪中期，在牛顿力学影响下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地震波联系起来。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。有些人们开始保存并定期公布地震事件，1840年冯霍夫(Von Hoff)首次发表了全球地震目录。

牛顿的故事告诉我们：科学的重大突破需要旷世的科学理论问世。