刘光鼎　著

地球物理引论

DIQIUWULIYINLUN



上 海 科 学 技 术 出 版 社

需要全本请访问www.ertongbook.com

图书在版编目(C Ⅰ)数据

地球物理引论 / 刘光鼎著. —上海：上海科学技术出版社，2005.11

ISBN 7-5323-8005-X

Ⅰ.地… Ⅱ.刘… Ⅲ.地球物理学 - 概论 Ⅳ.P3

中国版本图书馆CIP 数据核字（2005）第045000 号

地图批准号：GS（2005）382 号

世 纪 出 版 集 团
上海科学技术出版社 出版、发行
（上海钦州南路71 号 邮政编码200235）
新华书店上海发行所经销
印刷有限公司印刷
开本850 × 1168 1/32 印张5.125 字数120 千字
2005 年11 月第1 版 2006 年11 月第1 次印刷
印数：1 — 5 000
定价：19.00 元

如发生质量问题，读者可向工厂调换

前QIAN YA言

地球是人类赖以生存和发展的空间。对于地球，我们都知道，地下蕴藏着社会可持续发展所需要的各种矿产资源，而且为了使人类生活得更好，我们有责任和义务来保护地球，以改善我们的生存环境，并减轻和防治自然灾害。

但是，我们对地球究竟了解多少呢？它的结构、成分如何？它是如何工作的？它又是如何变化的？在地球上，地震的发生、火山的爆发，以及大洋盆地和高山峻岭的存在，是什么原因引起的？对这些自然现象没有深刻的认识与了解，又如何能够合理地开发、利用地下埋藏的矿产资源？又如何能够保护环境和防止灾害呢？

其实，人类从有史以来就执着地对地球进行着探索，希望揭开地球内部的奥秘，渴望认识地球的起源及其演化。可以说，基础科学的诞生，无论是数、理、化，还是天、地、生，都在某种程度上与地球有着关联。由地亩与河道的丈量发展出三角学和几何学，进而上升出数学思维体系；地球上多种现象的发现，如引力、磁性、声、光、电、热以及后来的放射性，成为物理学的发轫；而由炼丹术引申出对岩石、矿物的分析化验，则是化学的开端。

在世界科学的进步过程中，地质学家踏遍千山万水，从地球表面露出的岩石、矿坑中展布的地层来认识断层、褶皱和岩脉，确定其生成时代，推断构造运动，深化其发生、发展的历史。这样，地质学家从野外实际观测出发，对积累起来的大量资料，进行综合、概括，即运用理性思维寻求对地球的认识。物理学与化学在分别建立起各自的理论、方法与技术并形成独立的基础科学体系之外，又反过来研究地球，从而出现地球物理学与地球化学。物理学家在实验室的特殊

条件下，对力、热、声、光、电、磁和放射性等物理现象进行实验和观测，探索其规律，建立数理方程，并寻求其解答；而地球物理学家乃是应用物理学的理论、方法和技术来认识地球，只不过是将物理实验从实验室搬到野外，在陆地、海洋直至空中进行数据采集（正演问题），再对所采集的数据作处理解释（反演问题）。同样，地球化学家则是将野外采集的样品拿到实验室里进行化验和分析，以了解元素的分布与富集，并作出地质解释。应该指出，地质、地球物理、地球化学分别有自己独立的理论、方法和技术，是从不同的角度来研究并认识地球，只有使它们相互渗透、相互补充，才能使片面认识上升到比较全面、更加深刻的认识。因此，地球科学应该是地质学、地球物理学和地球化学的高层次综合或集成，尽管各学科又分别有各自的前沿问题有待于深化解决。

地球是一个处于运动和变化中的巨系统。它不仅体积庞大，结构和成分复杂，而且有漫长的演化历史。为此，研究地球必须分层次，进行不同尺度的调查，包括地质、地球物理与地球化学调查。大范围、小比例尺的调查能够把握宏观规律，指导微观实际调查。应该指出，20 世纪以来，大陆漂移、海底扩张和全球板块大地构造的出现，使地球科学发生了巨大的变化，而这些理论观点的形成以及地壳与上地幔的讨论，都是以地球物理对大洋观测为根据并以地质与地球物理相结合的。因此，可以认为，20 世纪地球科学的发展中，地球物理一直在起着先导作用。

我们伟大的祖国屹立在地球的东方。她背靠欧亚大陆，东临太平洋，南邻印度洋，国土辽阔，陆地达 960 万平方公里，海域近 300 万平方公里，更有岛屿 6 500 多个。5 000 年来，中华民族在这片土地上辛勤耕耘，在这片海洋上勇敢捕捞，历尽了艰难困苦，但仍不断地坚持开拓进取，创造出灿

烂辉煌的中华文化。现在，觉醒了的中华民族，改革、开放，科教兴国，正在通过建立社会主义市场经济，建设我们美好的家园。

地球科学的基本任务是认识地球，同时为人类服务，包括矿产资源勘查、环境保护和灾害防治等。对于中国来说，地球科学则应是为满足国民经济建设所提出的广泛需求服务。祖国大地在漫长的地质历史中几经沧桑，多有分合变迁，以致山系规模雄伟，地质结构复杂，但其中矿产资源的蕴藏却是丰富的。我们不应为目前还没有发现充分的能源与矿产而彷徨，也不应为暂时的困难（如资料短缺）而消沉。要知道，振兴中华是一项宏伟的工程，是前所未有的伟大事业。我们必须努力积累数据与经验，不断加深对祖国大地的认识，进而发现更多的矿产资源，其勇气和信心在于依靠科学技术。只要我们充分运用现代科学技术，脚踏实地地研究中国，深刻认识中国海陆地区的形成演化历史，按照客观规律，抓住特色，因地制宜地开展工作，就一定能够在这片广阔的大地上寻找出更多、更丰富的金属与非金属矿床，开发出更大、更经济的油气田，为国民经济建设提供充分的物质基础。

当前，我国空前规模的社会主义经济建设正在全面地向纵深发展，已经向地球科学，特别是地球物理学提出了一系列重大课题，例如：发现更多的油气资源；对油气田开发进行监测，努力提高采收率；为适应机械化采煤而解决小断层、陷落柱、老窖水、瓦斯气以及采空区问题；勘探、开发煤层气，并加以利用；攻深找盲，寻找大矿富矿，以解决铜、金等固体矿产资源不足；寻找并开发地下水，特别是在老、少、边、穷地区；监测环境变化；预测并减轻自然灾害，包括洪水、地震以及旱涝、滑坡、泥石流等。

对于这些重大课题，应有全面的规划和统筹安排，在重

需要全本请访问 www.ertongbook.com

点突破的基础上，积累经验，逐步展开。但是，除油气资源勘探外，探查的深度大都在0～1 000米的范围内，因此，可以说和国民经济建设关系最为密切是地球的浅部，而且社会、经济的发展还会向地质、地球物理提出一系列工程项目，例如，水利、电力、铁路、交通、航运和国防都要求开发隧道、修筑堤坝、建立港口、机场、码头，以及铺设电缆和管道等的建设和监测，建筑物需要桩基等，只有用地球物理方法去进行检测，才能够获得比钻探简便、经济而又精确、快速的效果。此外，随着市场经济的发展，还会涌现出新任务。例如，近年我国公路和民航事业的发展，迫使铁道部门不得不提高火车的运行速度，但又要保证火车运行安全，就产生铁路基础的承受能力问题。这种问题的解决，地球物理方法比钻探更具竞争力。一般地说，只要少量钻孔对地球物理资料进行检验，就可以对相当面积的地下情况取得了解，具有多、快、好、省的效果。

总之，中国国民经济建设对地球科学，特别是地球物理学有广泛的需求，从而在国民经济建设中应用地球物理学有极为广阔的前景。这对地球物理来说，既是一种机遇，也是一种挑战。机遇是说我国的国民经济建设为地球物理学提供了广阔的应用场所，英雄有了用武之地，可以大展身手，切实地作出贡献；挑战是说地球物理学必须勇敢地面对国民经济建设提出来的课题，对于中国复杂的地质情况，它可能会是高难度的，但中国地球物理学家是经受过锻炼的，经得起考验的，一定会在知识创新体系中，崭露头角，凭借我们对中国特色的深刻认识，创造性地解决这些问题。

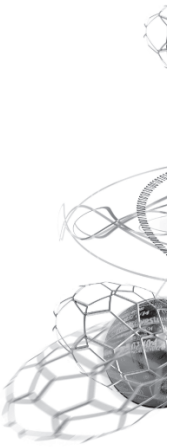
这样，为了实施“科教兴国”战略，迎接21世纪经济的挑战，作者在本书中重点阐述地球物理，因为它是现代探索地球内部的高科技，没有地球物理的广泛应用，地球科学只

能站在现代化的大门之外；而仅将地球物理的作用降低成找矿勘探的工具，则只能停留在表面的肤浅的认识水平上，使地球科学作用的发挥受到局限。为此，根据地球科学的任务，即认识地球，同时为资源勘探、环境保护和灾害防治的原则精神，首先，本书阐述了20世纪以来地球科学的发展，即对地球的认识经历了大陆漂移、海底扩张到岩石层板块大地构造的进步，进而说明根据大地构造对中国海陆形成演化及其对矿产资源的制约作用。其次，概略说明各种地球物理场的理论和方法及其应用技术，而重点强调地质和地球物理的综合研究。第三，从资源、环境、灾害等方面通过实例来说明地球物理的应用，最后则强调地球物理为国民经济建设服务，当然，也希望国民经济建设能够依靠地球物理。显然，针对中国的特点来阐述地球科学，特别是地球物理的理论、方法、技术及其应用，在知识经济时代是有重要意义的。

在编写的过程中，得到了中国地质大学程业勋教授、王家映教授、刘崧教授、李大心教授和同济大学王家林教授、江苏省工程物理勘察院钱耀中教授级高工、浙江省地球物理技术应用所赵竹占教授级高工以及中国科学院地质与地球物理研究所郝天珧研究员、张福勤博士和祝靓谊博士的帮助，谨此表示深深的感谢。

2005年8月



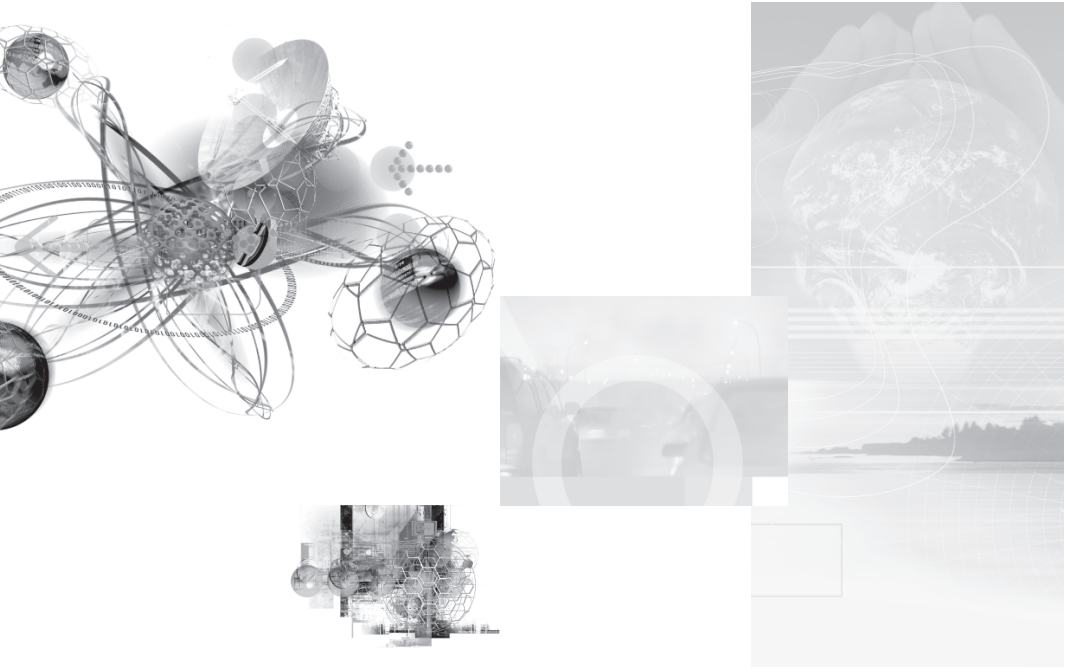


目录

前言

第1章 地球与地球科学 · · · · · · · · · · · · · · · · · 1
§ 1.1 今日的地球 · · · · · · · · · · · · · · · 3
§ 1.2 活动的地球 · · · · · · · · · · · · · · · 12
§ 1.3 演化的地球 · · · · · · · · · · · · · · · 27
§ 1.4 中国在全球构造中的位置 · · · · · · · 35
§ 1.5 地球物理学是地球科学的先导 · · · · 42

第2章 地球物理学的方法、技术 · · · · · · · · · · · 53
§ 2.1 重力场与重力测量 · · · · · · · · · · 57
§ 2.2 地磁场与磁力勘探 · · · · · · · · · · 63
§ 2.3 地电场与电法勘探 · · · · · · · · · · 70
§ 2.4 地震波场与地震勘探 · · · · · · · · · 74



MULU

§ 2.5　辐射场与放射性测量 82
§ 2.6　地温场与地热测量 85
§ 2.7　综合地质地球物理研究 88

第 3 章　应用地球物理学 91
§ 3.1　区域综合地球物理研究——以松辽盆地北部为例 94
§ 3.2　地球物理与资源勘探 105
§ 3.3　地球物理与工程建设 115
§ 3.4　地球物理与环境监测 130
§ 3.5　地球物理与灾害防治 142

后　　记 151
参考文献 153

第 1 章

地球与地球科学



唐朝诗人白居易在《长恨歌》中有名句：“上穷碧落下黄泉，两处茫茫皆不见。”借用这个诗句表述地球，确实是再恰当不过了。“碧落”指青天，地球是太阳系中的一个星体，而太阳系则是时间和空间都无限的宇宙的组成部分，天外有青天。“黄泉”指地下，即固体地球的内部。“碧落”和“黄泉”都看不到，只有借助仪器来进行观测了。因此，实际观测在地球科学中是重要的，第一性的。

长期以来，人类一直在不断深化对地球的认识，以为寻找和合理利用地球资源，保护和改善生存环境，防治和减轻自然灾害来提供科学依据，其目的则是促进人类社会与自然环境的持续协调发展。

在20世纪里，地球科学逐渐形成体系，并得到长足的进步，已经从地球的一般特征——如形状、大小、结构与物质组成，深化到了解地球在太阳系中诞生并发展、演化到目前状态的历史，对地球的物理、化学、地质作用过程，不仅是“将今论古”，而且建立详细的、定量的概念性预测模式，以提高对地球时空演化过程及其与人类社会经济之间相互关系的认识。这里，地质学根据地表岩石露头、坑道地层展布以及钻孔岩心、岩屑等多种资料，来认识岩石的组成，构造运动和地质作用，进而推断地质演化的历史。地球物理是应用物理学的原理、方法和技术来研究地球的内部结构、运动状态和各种物理过程。地球化学则从化学的角度来研究地球中元素的迁移、富集及其在时间和空间中的分布与演化。因此，只有使地质、地球物理与地球化学的探索相互结合，并进行高层次的综合研究，才有可能对巨大而复杂的地球，以及其上某个地区作出比较全面的规律性认识，并用来指导实践活动。这才是现代地球科学。但是，对于地球的认识，仍旧是从地球的现状开始，由浅入深，由表及里，不断深化的。

需要全本请访问 www.ertongbook.com



§1.1 今日的地球

地球是庞大而复杂的。在漫长的形成演化过程中，地球始终处于运动和发展之中。地球现今的状态，是我们了解其过去历史的依据，又是预测未来发展的出发点。地球现今的状态包括地球表面的特征和地球内部的结构与状态。

1. 地球特征

地球的表面，可以简单地划分为陆地和海洋两种不同类型。地球表面总面积为 $5.1 \times 10^8 km^2$，其中海水覆盖着的海洋面积为 $3.62 \times 10^8 km^2$，占 71%，而高出海平面的陆地面积为 $1.48 \times 10^8 km^2$，占 29%。陆地并不是均匀地分布于地球表面，它的大部分集中在北半球，而只有小部分在南半球。但是，如果覆盖着南极洲和格陵兰岛的冰盖全部融化，则今日的海平面将要升高 70m，上述地球表面的海陆分布格局就会全部改观，大片的陆地将要被海水淹没。然而，如果将海水从地表排走，使海平面下降 200m，则全世界的大陆架地区就将全部暴露于地表。如果使海平面下降到4～6km的深度，即使大洋底也暴露于地表，则可以清楚地看到整个地球固体表面的情况。这样，地球固体表面有两个主要的特征，即大陆台地和大洋盆地。它们之间的分界在大陆坡，也就是从大陆边缘向外，以 3°～6° 倾角急剧下降处，其深度增加到4～6km的深海底（图1.1）。

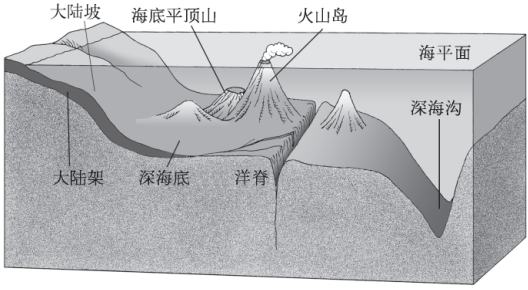


图 1.1　海陆地形示意图

大陆台地出露于地表，地形复杂而多样，既有高山峻岭，也有平原低地，其间还有奔腾的江河与秀丽的湖泊。以亚洲为例，如果沿北纬 30° 横切一个地形剖面，可以看出，从青藏高原冈底斯山脉（平均海拔4 000m以上）向东进入四川盆地和云贵高原（平均海拔2 000～1 000m 以下），经大兴安岭—太行山—武陵山以东地区（平均海拔低于500m），再向东，进入东海大陆架（在海平面以下达200m），经冲绳海槽、琉球群岛和琉球海沟，进入太平洋（水深达4 000～6 000m），地势是自西而东逐级下降的。长江、黄河也随地势自西而东奔流入海。世界最高峰珠穆朗玛峰海拔 8 848m，被称为是南极和北极之外的世界第三极。而琉球海沟水深超过4 000m，其间地形高差竟达12km以上。还应该指出，在太平洋西部和北部有阿留申群岛、千岛群岛、日本列岛、琉球群岛和菲律宾群岛，它们都是火山熔岩堆积而成，各自呈弧形展布，其形状好像经过装饰的垂花彩带，因此称为岛弧，也有人称之为花彩列岛。岛弧向太平洋一侧有狭窄而深邃的海沟，而岛弧向陆一侧，即弧后，有一系列边缘海，如白令海、鄂霍次克海、日本海、东海和南海，也称为弧后盆地。海沟—岛弧—弧

后盆地系统是今日西太平洋的地质构造特征，也是地球表面的一个重要特色。

大陆台地上有山脉隆起。它们大多是最近6 500万年内形成的年青山系，约占地球总面积的10%，这些年青山脉主要集中在地中海—亚洲一带，从阿尔卑斯山脉、喜马拉雅山脉、印度尼西亚、新几内亚到新西兰，伴随有强烈的地震和火山活动，表明这是地球表面具有强烈活动性的地带。同样，环太平洋的火山岛弧，如菲律宾群岛、日本列岛等，以及阿拉斯加、落基山脉、安第斯山和南极洲，则是地表另一条有强烈地震和火山的地带。

应该强调指出，在海洋底也有雄伟壮观的山脉分布。它是全球规模的山脉体系，横贯大洋盆地，长达65 000km以上，平均宽度为1 000km，覆盖着地球总面积的25%。但是，若不是现代有一系列探测大洋底的仪器设备涌现出来，对这样庞大巍峨的海底山脉，还真一无所知，除非把4～6km的海水层从大洋中搬走。这个海底山脉体系，通常被称为洋脊（Oceanic Ridge）。其中一支洋脊横过北冰洋，纵穿大西洋，经过非洲和南极洲之间，进入印度洋；另一支洋脊则由红海出发，横越印度洋，在澳大利亚和南极洲之间穿过太平洋，而在加利福尼亚湾附近与北美洲相遇。因此，洋脊是近代应用地球物理方法发现具有世界规模的洋底山脉体系，也是地球的基本特征之一。

洋脊不仅具有宏大的规模，还具有形态上的复杂性和强烈的活动性。任何一支洋脊都受到一系列与之相垂直的大断裂所切割和错动，从而使大洋底地形崎岖不平，既有陡峭的悬崖和深邃的裂谷，更在洋脊脊峰的中央裂谷处有大量浅源地震活动，在洋脊两侧斜坡上有岩浆喷溢后留下来的火山锥，它们受剥蚀而成平顶山。



总之，地球固体表面的基本特征是与各种活动带紧密联系在一起的。地表活动带的标志是地震的发生和火山的喷发，而引起地震和火山等现象的主要原因则在于地球内部的运动过程，或者说，由于地球内部能量的释放导致地震和火山的活动，它们能够造成严重的自然灾害，使人民生命财产毁于顷刻之间。

地球始终是处于运动发展之中的。地球内部的均衡或平衡只是暂时的、相对的，而不均衡、不平衡则是永存的、绝对的。地球内部的运动使得地球表面出现大陆和海洋。如果大陆的平均高度为 0.88km，洋底的平均深度为 3.7km，其间相差 4.6km，则是地球为了均衡而不断调整的结果。由地壳和上地幔顶部的坚硬岩石组成的岩石层（Lithosphere)，可分为几个大板块（Plate），漂浮于相对具有塑性的软流层（Asthenosphere）之上，并受到地球内部过程的作用而产生缓慢的运动，以致在板块之间以及板块内部的活动带上表现出地震和火山的活动。

2. 地球内部结构与物理性质

探索地球的起源、发展和活动，始终是人类文明进程中的重要课题。有史以来，人类就在地球的有限空间内，为谋求生存而耕种、狩猎和渔捞。后来为发展工业生产而寻找并开采地下蕴藏的矿产资源，其中包括石油、天然气、煤炭等能源以及各种金属和非金属矿床；现在为了谋求人类社会与自然之间的持续协调发展，在资源勘探、开发的同时，还必须加强环境保护和灾害防治。所有这些都需要在不断深化对地球认识的基础上，尽可能了解地球内部结构、物理性质及其中各种地球动力学过程，作为生产实践的理论指导，进而探讨所研究对象的成因机制与制约

条件，以合理地解决问题。

对于地球内部结构及其物理性质的研究，迄今为止仍不能完全通过直接取样的手段去进行测定。世界上最深的钻井是前苏联在科拉半岛的超深钻，也才打到13km不到的深度，对于了解地球内部结构来说，确实太浅了。因此，当前认识地球内部主要仍是依靠间接方法，即地球物理方法。

19世纪末，俄国地震学家伽利津（B.B.Golitsyin）就已经认识到地震波在研究地球内部结构中的重大作用。他说："地震好像一盏灯，终究会照亮地球的内部。"地球是一个庞然大物，只有强大的地震波才能达到地球内部的任何深度，并将其中有关结构及物理性质的信息带回地面上来，从而，测定地震波在地球内部的传播速度，是了解地球内部结构及其物理性质的重要途径。

地震波根据其质点振动方向与传播方向间的关系分为两种基本类型：质点振动方向与传播方向一致的称为纵波，也称P波；质点振动方向与传播方向相互垂直的称为横波，也称S波。地震波在介质中传播时，纵波可使固体、液体或气体产生膨胀与压缩现象而通过；横波只能在固体中产生切变，不能使流体改变形状，从而横波只在固体中通过，在流体中不能通过。地震波在地球内部传播，其传播速度随深度的变化而不同。地震波传播速度取决于地球介质的弹性和密度。根据观测发现，地震波在地球内部传播时，其速度有几个发生急剧变化的界面，称为速度间断面（Discontinuity），它们也是速度和密度不连续的界面（图1.2），由此作为认识地球内部结构的依据。

1909年，南斯拉夫的地震学家莫霍洛维契奇（A.Mohorovičić）首先在克罗地亚的一张天然地震记录上

发现第一个间断面，纵波速度由 7.6km/s 突增到 8.1km/s，横波速度由4.2km/s增加到 4.6km/s。后来将这个间断面称为莫霍面，作为地壳的底界，即在此界面以上的地球层圈为地壳（Crust）。

1914年，古登堡（B.Gutenberg）在地震记录上发现了第二个间断面，它存在于地球内部2 900km深度上，纵波速度由 13.6km/s降低到8.1km/s，而横波速度由7.3km/s突然消失。将这第二个间断面称为古登堡面，并作为地幔与地核之间的分界，即在古登堡面以上至莫霍面之间称为地幔（Mantle），其下至地心称为地核（ Core）。

这样，根据地震波在地球内部传播的速度 - 深度曲线（图1.2），取得对地球内部结构的基本认识。地球内部是由圈层组成的（图 1.3），由表及里，它们分别为地壳、地幔和地核，其间分界面是在全球广泛分布的莫霍面和古登堡面，这样划分地球内部结构是有普遍意义的。但是，随着

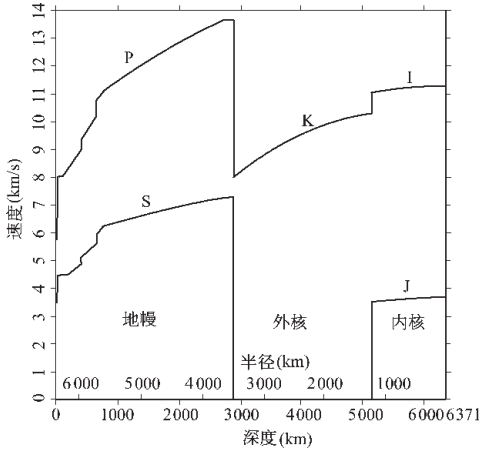


图 1.2　速度 - 深度曲线

需要全本请访问 www.ertongbook.com