

# 地震波理论基础

*Introduction of Seismic Wave Theory*

王有学 编著



地质出版社

# 地震波理论基础

王有学 编著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书着重阐述了地球内部结构及地震波的分类、天然地震中的地震波震相、弹性介质中的应力及应变分析、波动方程的推导、波动方程的求解、波的传播特征、面波理论、黏弹性介质中的地震波、射线理论、几何地震学等方面的地震波理论。同时,对地震波数据处理及分析所涉及的数字信号处理技术及目前应用最为广泛的地震学方法——地震波走时层析成像和接收函数方法也一并在本书中进行了介绍。

本书可供有关院校应用地球物理专业的师生阅读,也可供从事地球物理研究的技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

地震波理论基础 / 王有学编著. —北京:地质出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-116-06998-5

I. ①地… II. ①王… III. ①地震波-理论 IV. ①P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 241649 号

## DIZHENBO LILUN JICHU

责任编辑:王春庆

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:[zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真:(010) 82324340

印 刷:北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$

印 张:12.5

字 数:300 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2011 年 3 月第 1 版

印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

定 价:18.60 元

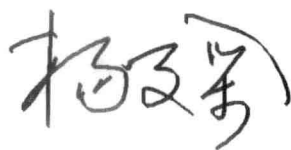
书 号:ISBN 978-7-116-06998-5

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 序

应用地球物理学的一个重要的源头乃是地震波理论。有不少人认为地震勘探只是一门应用技术，而不是一门应用科学。诚然，反射地震勘探一开始只是一门油气勘查的技术。1926 年在美国奥克拉荷马洲根据反射地震探测发现了油田，证明反射地震的确是一门有巨大经济价值的实用技术。此后，经过几十年的努力，应用地震学的理论迅速发展，在 20 世纪 70 年代开始出现了 Reflection Seismology 的多部专著。但是，由于地震勘探方法技术的更新速度太快，这些专著都不可能涵盖应用地震学理论发展的新内容，而大学的教材却仍然停留在引用弹性力学公式的基础上，没有突现地震勘探自身的理论传授。现在，王有学教授根据自身多年的科研与教学实践，编写了地震波理论的教材，以便为学生了解应用地震学理论体系提供坚实的知识，值得庆贺。

王有学教授多年来活跃在应用地震学的科研第一线，取得了丰硕成果。近年来他应邀前往德国、美国、法国、加拿大等国进行学术交流与科研合作，现在桂林理工大学从事研究与教学工作，风华正茂。他思维活跃、学风严谨，本书的编纂出版将弥补相关领域的薄弱点，对应用地震学的理论传播与人才培养起到重要的促进作用。



(中国科学院院士)

二〇一一年二月

# 前 言

本书主要根据作者多年来在科研及教学中的感受及经验,试图对地震波理论基础做一个系统性的介绍,力图使本书在结构上承上启下,在内容上广揽各家所长,翔实具体、通俗易懂,使读者不需要查阅太多的书籍,就能基本上掌握地震波的基本理论。本书的另外一个特色就是在一些公式、定理的推导及证明方面,尽可能介绍了不同的证明方法及推导途径,使读者对其来龙去脉有一个清楚的了解。

本书共分十二章,第一章对地球内部结构、地震波的分类及天然地震的主要震相进行了介绍;第二章对弹性介质中的应力及应变进行了分析;第三、四、五、六章对各向同性弹性介质中波动方程的推导、波动方程的求解、波的传播及均匀各向同性弹性介质中的面波理论等进行了详细的阐述与推导,包括一些著名定理及方程,诸如斯奈尔定律、佐普里兹方程等;第七章对黏弹性介质中的地震波作了简单的介绍;在第八章射线理论中,从射线级数出发,导出程函方程及传输方程,进而根据射线方程,对地震波在不同介质中传播时的射线几何路径及旅行时间特征进行了分析;第九章对地震波传播的几何学特征及时距曲线特征进行了详细的分析;第十章介绍了地震波数据处理及分析所涉及的数字信号处理技术;在本书的最后两章中,对目前应用最为广泛的地震学方法——地震波走时层析成像和接收函数方法进行了介绍。

本书是在科研和教学工作的基础上编写的。作者希望本书能为地球物理专业的本科生和研究生学习地震波理论提供一本较完整的、系统的入门教材,也希望能对从事地震波理论及应用研究的科研人员有所帮助。在编写过程中,作者参考了不少有关地震波理论的著作、教材和论文,吸收和借鉴了学术界同仁的许多成果,特向学术界同仁表示感谢。同时,本书的出版得到桂林理工大学的大力支持与资助,借此机会,向桂林理工大学、地质出版社以及为本书校对付出辛勤劳动的韩果花老师,王海燕、杨强两位研究生表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏、不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2011年2月于桂林

# 目 录

## 序 前 言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 地震波及地球内部结构           | 1  |
| 第一节 地球的圈层结构              | 1  |
| 第二节 地震波及其分类              | 10 |
| 第三节 地震波震相及其性质            | 11 |
| 第二章 应力及应变分析              | 20 |
| 第一节 基本概念                 | 20 |
| 第二节 应力及应变                | 21 |
| 第三节 体变模量、杨氏模量和泊松比        | 25 |
| 第三章 各向同性弹性介质中的波动方程       | 28 |
| 第一节 各向同性弹性介质中的波动方程       | 28 |
| 第二节 波动方程中的位移矢量的标位和矢位     | 31 |
| 第四章 各向同性介质中波动方程的解        | 32 |
| 第一节 波动方程的达朗贝尔解           | 32 |
| 第二节 波动方程的克希霍夫解           | 35 |
| 第五章 各向同性介质中平面波的传播        | 40 |
| 第一节 入射纵波在介质分界面上的反射和透射    | 40 |
| 第二节 入射 SV 波在介质分界面上的反射和透射 | 46 |
| 第三节 入射 SH 波在介质分界面上的反射和透射 | 50 |
| 第六章 均匀各向同性弹性介质中的面波       | 54 |
| 第一节 面波的波动方程及其分类          | 54 |
| 第二节 无限半空间自由界面上的瑞利波       | 57 |
| 第三节 各向同性弹性介质分界面上的瑞利波     | 64 |
| 第四节 均匀各向同性弹性介质中的勒夫波      | 67 |
| 第七章 黏弹性介质中的地震波           | 71 |
| 第一节 黏弹性介质中的波动方程          | 71 |
| 第二节 黏弹性介质中波的传播特征         | 73 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第八章 射线理论</b>         | 75  |
| 第一节 射线级数                | 75  |
| 第二节 程函方程及传输方程           | 76  |
| 第三节 射线方程                | 77  |
| 第四节 连续介质中的地震波射线理论       | 80  |
| 第五节 射线追踪                | 84  |
| <b>第九章 几何地震学</b>        | 88  |
| 第一节 基本原理及概念             | 88  |
| 第二节 直达波                 | 94  |
| 第三节 反射波                 | 95  |
| 第四节 折射波                 | 108 |
| 第五节 绕射波                 | 118 |
| 第六节 井中地震波               | 119 |
| 第七节 地震波在特殊构造中的传播        | 122 |
| <b>第十章 地震波的数字信号处理技术</b> | 131 |
| 第一节 傅里叶级数及傅里叶变换         | 131 |
| 第二节 离散序列的频谱分析及褶积运算      | 141 |
| 第三节 线性滤波系统及数字滤波         | 148 |
| 第四节 数字信号的相关分析           | 158 |
| <b>第十一章 地震波走时层析成像</b>   | 164 |
| 第一节 廻折波走时层析成像           | 164 |
| 第二节 透射波走时层析成像           | 166 |
| <b>第十二章 接收函数</b>        | 174 |
| 第一节 基本概念                | 174 |
| 第二节 接收函数及其提取            | 177 |
| 第三节 接收函数的反演             | 182 |
| <b>附 录</b>              | 185 |
| 附录 I 数学算子及变换            | 185 |
| 附录 II IASPEI 标准地震震相及其性质 | 188 |
| <b>参考文献</b>             | 192 |

# 第一章 地震波及地球内部结构

人类在地球上已经生活了二三百万年，地球的内部到底是个什么样子呢？有人设想，如果我们向地心挖洞，把地球对直挖通，不就可以到达地球的另一端从而对地球有一个完整的认识了吗？目前，世界上最深的钻井是前苏联在科拉半岛实施的超深井，该井于1970年5月24日开钻，于1994年终钻，钻井深度达到了12262m，也仅为地球半径的1/500。所以，迄今为止，人类借此来认识地球内部结构是远远不够的。然而，就在我们人类赖以生存的地球上，每天都在发生着地震，给人类带来很多的灾难。据美国地质调查局统计，每年共有三百万次地震，平均每11秒地球便会发生一次地震。但是，在给人类带来无穷灾难的同时，地震也为人类认识地球提供了丰富的信息，科学家们根据地震波所携带的有关地球内部结构的信息，揭示了地球内部的许多秘密。

目前人类对地球内部结构的认识主要来自地震学研究，因此，地震学也就成为地球科学中的一门重要学科。地震波可以穿透地球深部，并能把地球内部的信息带回地面。迄今为止，关于地球深部的结构、组成、过程和状态等知识大多来自天然地震所产生的地震波信息。同时，天然地震产生的地震波信号能量强，是研究整个地球内部的有力工具。所以，地震恰似一盏明灯，“照亮”了地球内部的每一个角落，“照亮”了整个地球内部，使人类认识地球的内部结构有了可能。

## 第一节 地球的圈层结构

地球的内部结构具有圈层结构特征，很多著名的地球物理学家根据天然地震资料对其进行了系统的研究和论述。研究表明，地球可以分为地壳、地幔、地核三大圈层，其中地壳由康拉德（Victor Conrad，1876~1962）界面分为上地壳和下地壳，地幔由莫霍（Moho）界面与古登堡（Gutenberg）不连续面之间的上地幔及下地幔组成，地核可以进一步划分为外核、地核过渡带和内核（图1-1）。

莫霍洛维奇（Andrija Mohorovičić，1857~1936）在研究地球内部结构时，发现在地下30~60 km深处的纵波速度存在一个跳跃，由6~7km/s突变到8km/s左右，他认为是地壳与地幔之间的分界面，因而，这个界面又称之为莫霍面（Moho或M面）。莫霍面的深度，全球平均为33 km，在大洋之下平均仅为7km。

在地壳下部，随着深度的增加，速度也随之增大。但是，在大约2900km深处，地震纵波速度突然从13km/s下降到8km/s左右，而且横波消失，这一现象表明在该深处存在一个地震波速度间断面。这一现象是

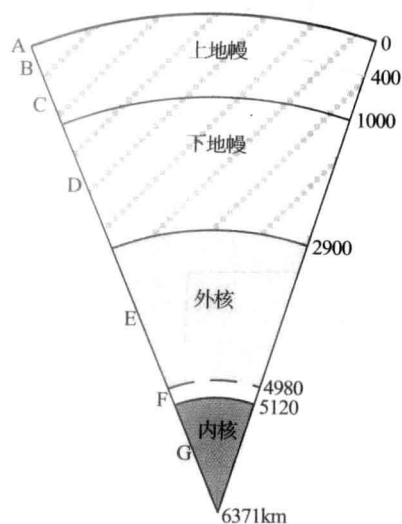


图 1-1 地球内部结构

美国地震学家古登堡 (Beno Gutenberg, 1889~1960) 在 1914 年首先发现的, 他认为这个界面是地幔与地核的分界, 故称之为古登堡不连续面 (G 面)。

从 2900km 开始进入地核, 纵波速度逐渐回升, 直到 5000km 左右, 纵波速度又有一个明显的跳跃, 横波也随之出现, 成为地球内部的第三个大的地震波速不连续面。丹麦地震学家莱曼 (Inge Lohmann, 1888~1993) 女士于 1936 年首先发现了这一不连续面, 故又称之为 L 面。

布伦 (Keith Edward Bullen, 1906~1976) 根据对地震波在地球内部传播的速度变化规律的研究, 将地球内部划分为 A, B, C, D, E, F, G 七层, 其中地壳为 A 层, 地幔分为 B, C, D 三层, 地核由 E, F, G 三层构成。

1965 年 Niazi 和 Anderson 在研究中发现, 在 320km 和 640km 附近存在两个地震波速度间断面。虽然这两个速度间断面附近的速度变化与核幔边界的速度变化相比要小得多, 但是它们对研究地幔的状态和组成都是非常重要的。随后, 综合大量的地震资料研究, 地震学家确认了在上地幔内部 410km 和 660km 深处的两个速度间断面在全球范围内的存在。

对于地球内部的结构, 众多的地球物理学家对其进行了深入的研究, 提出许多地球模型, 这给我们研究地球内部的物质组成和状态提供了宝贵的依据, 但同时也给后人在研究中的选用与取舍带来一定的难度。于是, 在 1971 年于莫斯科召开的 IUGG 会议上成立了一个“标准地球模型委员会”, 该委员会旨在建立一个可为大家都能接受的从地心到地表的标准地球结构模型, 包括主要物理参数和主要界面的定义。经过不断的讨论与改进, 1984 年 5 月国际地球标准模型委员会推荐杰旺斯基 (Adam Marian Dziewoński) 和安德森 (Don L. Anderson) 提出的初步地球参考模型 (Preliminary Reference Earth Model, 简称 PREM 模型), 作为当时国际临时使用的地球参考模型。

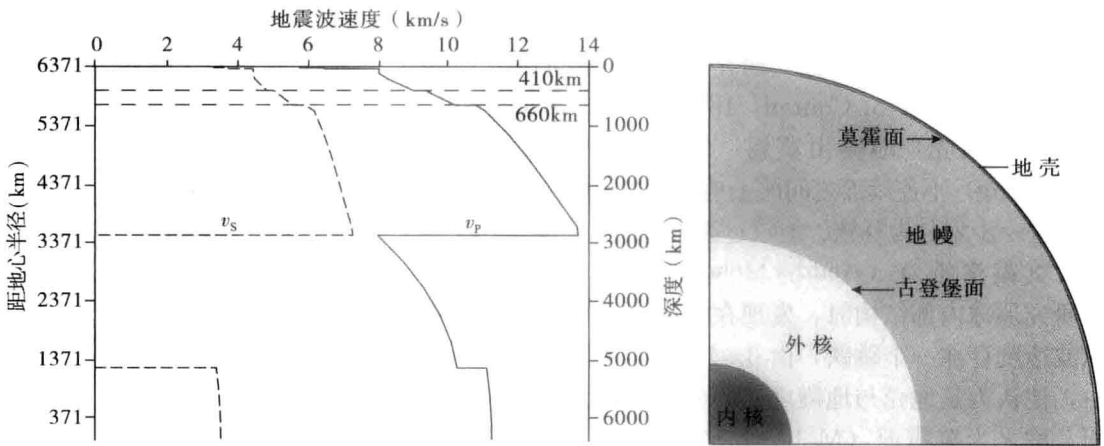


图 1-2 IASP91 地球模型

为了满足全球性地震研究的需要, 不限于个别地区特殊的上地幔结构的影响, 国际地震与地球内部物理学协会 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, IASPEI) 在初步地球参考模型的基础上, 于 1991 年建立了一个反映全

球性地球平均特征的地球模型，称之为 IASP91 模型（图 1-2；表 1-1），并且澳大利亚地震学家 B. L. N. Kennett 根据这一模型计算了不同震相的地震波在地球内部传播的旅行时间表（表 1-2~表 1-4）。

表 1-1 IASP91 地球速度模型参数表

| 层序 | 深度 (km)       | 距地心半径 (km)    | 纵波速度 $v_p$ (km/s)                            | 横波速度 $v_s$ (km/s)                                |
|----|---------------|---------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 01 | 0.0~20.0      | 6351.0~6371.0 | 5.80000                                      | 3.360000                                         |
| 02 | 20.0~35.0     | 6336.0~6351.0 | 6.50000                                      | 3.750000                                         |
| 03 | 35.0~120.0    | 6251.0~6336.0 | $8.78541-0.749530x$                          | $6.706231-2.248585x$                             |
| 04 | 120.0~210.0   | 6161.0~6251.0 | $25.41389-17.69722x$                         | $5.750200-1.274200x$                             |
| 05 | 210.0~410.0   | 5961.0~6161.0 | $30.78765-23.25415x$                         | $15.242130-11.085520x$                           |
| 06 | 410.0~660.0   | 5711.0~5961.0 | $29.38896-21.40656x$                         | $17.707320-13.506520x$                           |
| 07 | 660.0~760.0   | 5611.0~5711.0 | $25.96984-16.93412x$                         | $20.768900-16.531470x$                           |
| 08 | 760.0~2740.0  | 3631.0~5611.0 | $25.14860-41.15380x+51.99320x^2-26.60830x^3$ | $12.930300-21.259000x+27.898800x^2-14.108000x^3$ |
| 09 | 2740.0~2889.0 | 3482.0~3631.0 | $14.49470-1.47089x$                          | $8.166160-1.582060x$                             |
| 10 | 2889.0~5153.9 | 1217.1~3482.0 | $10.03904+3.75665x-13.67046x^2$              | 0.000000                                         |
| 11 | 5153.9~6371.0 | 0.0~1217.1    | $11.24094-4.09689x^2$                        | $3.564540-3.452410x^2$                           |

注：表中  $x=r/R$ ，其中  $r$  为距地心的半径， $R$  为地球的半径，且  $R=6371.00\text{km}$ 。

表 1-2 在地幔及地核中传播的地震波震相的旅行时间表

| 震中距<br>(°) | P    |       | PP   |       | PcP |       | S   |       | SS  |       | ScS |       | ScP |       | SKS <sub>ac</sub> |   |
|------------|------|-------|------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-------------------|---|
|            | min  | s     | min  | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min               | s |
| 0.0        | 0.00 |       | 0.00 |       | 8   | 31.28 |     | 0.00  |     | 0.00  | 15  | 35.57 | 12  | 03.43 |                   |   |
| 1.0        | 0    | 19.17 | 0    | 19.17 | 8   | 31.33 | 0   | 33.09 | 0   | 33.09 | 15  | 35.66 | 12  | 03.49 |                   |   |
| 2.0        | 0    | 35.03 | 0    | 38.34 | 8   | 31.47 | 1   | 01.73 | 1   | 06.19 | 15  | 35.93 | 12  | 03.68 |                   |   |
| 3.0        | 0    | 48.78 | 0    | 56.30 | 8   | 31.71 | 1   | 26.47 | 1   | 38.73 | 15  | 36.37 | 12  | 03.99 |                   |   |
| 4.0        | 1    | 02.53 | 1    | 10.05 | 8   | 32.05 | 1   | 51.19 | 2   | 03.47 | 15  | 36.99 | 12  | 04.42 |                   |   |
| 5.0        | 1    | 16.27 | 1    | 23.81 | 8   | 32.48 | 2   | 15.90 | 2   | 28.20 | 15  | 37.79 | 12  | 04.98 |                   |   |
| 6.0        | 1    | 30.01 | 1    | 37.56 | 8   | 33.01 | 2   | 40.59 | 2   | 52.94 | 15  | 38.76 | 12  | 05.66 |                   |   |
| 7.0        | 1    | 43.75 | 1    | 51.31 | 8   | 33.63 | 3   | 05.26 | 3   | 17.66 | 15  | 39.90 | 12  | 06.47 |                   |   |
| 8.0        | 1    | 57.47 | 2    | 05.06 | 8   | 34.35 | 3   | 29.91 | 3   | 42.38 | 15  | 41.22 | 12  | 07.40 |                   |   |
| 9.0        | 2    | 11.19 | 2    | 18.80 | 8   | 35.16 | 3   | 54.52 | 4   | 07.10 | 15  | 42.72 | 12  | 08.44 |                   |   |
| 10.0       | 2    | 24.90 | 2    | 32.55 | 8   | 36.06 | 4   | 19.10 | 4   | 31.80 | 15  | 44.38 | 12  | 09.61 |                   |   |
| 11.0       | 2    | 38.59 | 2    | 46.29 | 8   | 37.05 | 4   | 43.64 | 4   | 56.50 | 15  | 46.22 | 12  | 10.90 |                   |   |
| 12.0       | 2    | 52.27 | 3    | 00.03 | 8   | 38.14 | 5   | 08.14 | 5   | 21.19 | 15  | 48.22 | 12  | 12.30 |                   |   |
| 13.0       | 3    | 05.94 | 3    | 13.76 | 8   | 39.32 | 5   | 32.59 | 5   | 45.87 | 15  | 50.40 | 12  | 13.82 |                   |   |

续表

| 震中距<br>(°) | P   |       | PP  |       | PcP |       | S   |       | SS  |       | ScS |       | ScP |       | SKS <sub>ac</sub> |   |
|------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-------------------|---|
|            | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min               | s |
| 14.0       | 3   | 19.59 | 3   | 27.49 | 8   | 40.59 | 5   | 56.99 | 6   | 10.53 | 15  | 52.74 | 12  | 15.46 |                   |   |
| 15.0       | 3   | 33.23 | 3   | 41.22 | 8   | 41.95 | 6   | 21.33 | 6   | 35.18 | 15  | 55.24 | 12  | 17.20 |                   |   |
| 16.0       | 3   | 46.38 | 3   | 54.95 | 8   | 43.39 | 6   | 45.62 | 6   | 59.82 | 15  | 57.91 | 12  | 19.06 |                   |   |
| 17.0       | 3   | 59.13 | 4   | 08.66 | 8   | 44.93 | 7   | 09.86 | 7   | 24.44 | 16  | 00.73 | 12  | 21.03 |                   |   |
| 18.0       | 4   | 11.58 | 4   | 22.38 | 8   | 46.54 | 7   | 34.06 | 7   | 49.05 | 16  | 03.72 | 12  | 23.11 |                   |   |
| 19.0       | 4   | 23.16 | 4   | 36.09 | 8   | 48.25 | 7   | 58.22 | 8   | 13.64 | 16  | 06.86 | 12  | 25.29 |                   |   |
| 20.0       | 4   | 34.10 | 4   | 49.79 | 8   | 50.04 | 8   | 20.86 | 8   | 38.21 | 16  | 10.16 | 12  | 27.58 |                   |   |
| 21.0       | 4   | 44.95 | 5   | 03.49 | 8   | 51.91 | 8   | 40.80 | 9   | 02.76 | 16  | 13.61 | 12  | 30.00 |                   |   |
| 22.0       | 4   | 55.71 | 5   | 17.18 | 8   | 53.86 | 9   | 00.49 | 9   | 27.29 | 16  | 17.22 | 12  | 32.46 |                   |   |
| 23.0       | 5   | 06.34 | 5   | 30.87 | 8   | 55.89 | 9   | 19.14 | 9   | 51.80 | 16  | 20.97 | 12  | 35.04 |                   |   |
| 24.0       | 5   | 16.31 | 5   | 44.54 | 8   | 58.00 | 9   | 35.41 | 10  | 16.28 | 16  | 24.86 | 12  | 37.73 |                   |   |
| 25.0       | 5   | 25.43 | 5   | 58.22 | 9   | 00.19 | 9   | 51.46 | 10  | 40.75 | 16  | 28.90 | 12  | 40.50 |                   |   |
| 26.0       | 5   | 34.51 | 6   | 11.88 | 9   | 02.45 | 10  | 07.31 | 11  | 05.18 | 16  | 33.08 | 12  | 43.37 |                   |   |
| 27.0       | 5   | 43.54 | 6   | 25.54 | 9   | 04.79 | 10  | 23.11 | 11  | 29.60 | 16  | 37.40 | 12  | 46.32 |                   |   |
| 28.0       | 5   | 52.50 | 6   | 39.18 | 9   | 07.20 | 10  | 38.86 | 11  | 53.99 | 16  | 41.85 | 12  | 49.37 |                   |   |
| 29.0       | 6   | 01.41 | 6   | 52.83 | 9   | 09.68 | 10  | 54.58 | 12  | 18.34 | 16  | 46.43 | 12  | 52.49 |                   |   |
| 30.0       | 6   | 10.27 | 7   | 06.46 | 9   | 12.23 | 11  | 10.27 | 12  | 42.66 | 16  | 51.15 | 12  | 55.70 |                   |   |
| 31.0       | 6   | 19.10 | 7   | 19.76 | 9   | 14.86 | 11  | 25.92 | 13  | 06.96 | 16  | 55.99 | 12  | 58.98 |                   |   |
| 32.0       | 6   | 27.89 | 7   | 32.76 | 9   | 17.55 | 11  | 41.51 | 13  | 31.23 | 17  | 00.96 | 13  | 02.34 |                   |   |
| 33.0       | 6   | 36.64 | 7   | 45.60 | 9   | 20.30 | 11  | 57.05 | 13  | 55.49 | 17  | 06.06 | 13  | 05.78 |                   |   |
| 34.0       | 6   | 45.34 | 7   | 58.25 | 9   | 23.12 | 12  | 12.52 | 14  | 19.72 | 17  | 11.27 | 13  | 09.28 |                   |   |
| 35.0       | 6   | 53.98 | 8   | 10.77 | 9   | 26.00 | 12  | 27.93 | 14  | 43.93 | 17  | 16.59 | 13  | 12.85 |                   |   |
| 36.0       | 7   | 02.57 | 8   | 23.15 | 9   | 28.95 | 12  | 43.26 | 15  | 08.12 | 17  | 22.04 | 13  | 16.49 |                   |   |
| 37.0       | 7   | 11.09 | 8   | 35.33 | 9   | 31.95 | 12  | 58.52 | 15  | 32.30 | 17  | 27.59 | 13  | 20.19 |                   |   |
| 38.0       | 7   | 19.56 | 8   | 46.32 | 9   | 35.01 | 13  | 13.69 | 15  | 56.44 | 17  | 33.25 | 13  | 23.95 |                   |   |
| 39.0       | 7   | 27.96 | 8   | 57.28 | 9   | 38.13 | 13  | 28.78 | 16  | 20.57 | 17  | 39.02 | 13  | 27.77 |                   |   |
| 40.0       | 7   | 36.30 | 9   | 08.20 | 9   | 41.30 | 13  | 43.79 | 16  | 41.71 | 17  | 44.89 | 13  | 31.64 |                   |   |
| 41.0       | 7   | 44.57 | 9   | 19.08 | 9   | 44.53 | 13  | 58.70 | 17  | 01.71 | 17  | 50.87 | 13  | 35.57 |                   |   |
| 42.0       | 7   | 52.78 | 9   | 29.91 | 9   | 47.81 | 14  | 13.52 | 17  | 21.59 | 17  | 56.94 | 13  | 39.54 |                   |   |
| 43.0       | 8   | 00.91 | 9   | 40.69 | 9   | 51.14 | 14  | 28.25 | 17  | 41.35 | 18  | 03.11 | 13  | 43.56 |                   |   |
| 44.0       | 8   | 08.98 | 9   | 51.42 | 9   | 54.52 | 14  | 42.87 | 18  | 00.97 | 18  | 09.37 | 13  | 47.62 |                   |   |
| 45.0       | 8   | 16.97 | 10  | 02.08 | 9   | 57.95 | 14  | 57.41 | 18  | 20.45 | 18  | 15.72 | 13  | 51.73 |                   |   |
| 46.0       | 8   | 24.90 | 10  | 12.69 | 10  | 01.43 | 15  | 11.84 | 18  | 38.27 | 18  | 22.15 | 13  | 55.87 |                   |   |
| 47.0       | 8   | 32.75 | 10  | 23.22 | 10  | 04.95 | 15  | 26.16 | 18  | 54.59 | 18  | 28.68 | 14  | 00.05 |                   |   |
| 48.0       | 8   | 40.54 | 10  | 32.62 | 10  | 08.51 | 15  | 40.39 | 19  | 10.82 | 18  | 35.28 | 14  | 04.26 |                   |   |

续表

| 震中距<br>(°) | P   |       | PP  |       | PcP |       | S   |       | SS  |       | ScS |       | ScP |       | SKS <sub>ac</sub> |       |
|------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-------------------|-------|
|            | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min               | s     |
| 49.0       | 8   | 48.25 | 10  | 41.75 | 10  | 12.12 | 15  | 54.51 | 19  | 26.98 | 18  | 41.97 | 14  | 08.51 |                   |       |
| 50.0       | 8   | 55.89 | 10  | 50.86 | 10  | 15.76 | 16  | 08.53 | 19  | 42.93 | 18  | 48.73 | 14  | 12.78 |                   |       |
| 51.0       | 9   | 03.45 | 10  | 59.95 | 10  | 19.45 | 16  | 22.44 | 19  | 58.79 | 18  | 55.57 | 14  | 17.08 |                   |       |
| 52.0       | 9   | 10.95 | 11  | 09.01 | 10  | 23.18 | 16  | 36.24 | 20  | 14.63 | 19  | 02.48 | 14  | 21.40 |                   |       |
| 53.0       | 9   | 18.37 | 11  | 18.06 | 10  | 26.94 | 16  | 49.94 | 20  | 30.43 | 19  | 09.47 | 14  | 25.74 |                   |       |
| 54.0       | 9   | 25.72 | 11  | 27.07 | 10  | 30.74 | 17  | 03.52 | 20  | 46.22 | 19  | 16.52 | 14  | 30.10 |                   |       |
| 55.0       | 9   | 32.99 | 11  | 36.06 | 10  | 34.57 | 17  | 17.00 | 21  | 01.98 | 19  | 23.63 | 14  | 34.48 |                   |       |
| 56.0       | 9   | 40.20 | 11  | 45.00 | 10  | 38.44 | 17  | 30.37 | 21  | 17.73 | 19  | 30.81 | 14  | 38.87 |                   |       |
| 57.0       | 9   | 47.33 | 11  | 53.92 | 10  | 42.34 | 17  | 43.63 | 21  | 33.46 | 19  | 38.06 | 14  | 43.28 |                   |       |
| 58.0       | 9   | 54.39 | 12  | 02.82 | 10  | 46.27 | 17  | 56.78 | 21  | 49.17 | 19  | 45.36 | 14  | 47.69 |                   |       |
| 59.0       | 10  | 01.38 | 12  | 11.69 | 10  | 50.23 | 18  | 09.82 | 22  | 04.86 | 19  | 52.72 | 14  | 52.12 |                   |       |
| 60.0       | 10  | 08.29 | 12  | 20.55 | 10  | 54.22 | 18  | 22.74 | 22  | 20.54 | 20  | 00.13 | 14  | 56.55 |                   |       |
| 61.0       | 10  | 15.13 | 12  | 29.39 | 10  | 58.24 | 18  | 35.55 | 22  | 36.20 | 20  | 07.60 | 15  | 00.98 |                   |       |
| 62.0       | 10  | 21.90 | 12  | 38.20 | 11  | 02.28 | 18  | 48.25 | 22  | 51.84 | 20  | 15.12 | 15  | 05.42 |                   |       |
| 63.0       | 10  | 28.60 | 12  | 47.00 | 11  | 06.35 | 19  | 00.84 | 23  | 07.44 | 20  | 22.69 |     |       | 20                | 22.69 |
| 64.0       | 10  | 35.22 | 12  | 55.79 | 11  | 10.44 | 19  | 13.31 | 23  | 23.03 | 20  | 30.30 |     |       | 20                | 30.27 |
| 65.0       | 10  | 41.77 | 13  | 04.54 | 11  | 14.56 | 19  | 25.67 | 23  | 38.58 | 20  | 37.96 |     |       | 20                | 37.86 |
| 66.0       | 10  | 48.25 | 13  | 13.28 | 11  | 18.70 | 19  | 37.92 | 23  | 54.10 | 20  | 45.67 |     |       | 20                | 45.44 |
| 67.0       | 10  | 54.66 | 13  | 21.99 | 11  | 22.86 | 19  | 50.05 | 24  | 09.59 | 20  | 53.41 |     |       | 20                | 53.02 |
| 68.0       | 11  | 00.99 | 13  | 30.67 | 11  | 27.04 | 20  | 02.07 | 24  | 25.05 | 21  | 01.20 |     |       | 21                | 00.58 |
| 69.0       | 11  | 07.25 | 13  | 39.33 | 11  | 31.23 | 20  | 13.97 | 24  | 40.47 | 21  | 09.02 |     |       | 21                | 08.13 |
| 70.0       | 11  | 13.43 | 13  | 47.96 | 11  | 35.45 | 20  | 25.75 | 24  | 55.86 | 21  | 16.88 |     |       | 21                | 15.67 |
| 71.0       | 11  | 19.55 | 13  | 56.56 | 11  | 39.69 | 20  | 37.42 | 25  | 11.21 | 21  | 24.78 |     |       | 21                | 23.18 |
| 72.0       | 11  | 25.59 | 14  | 05.13 | 11  | 43.94 | 20  | 48.97 | 25  | 26.52 | 21  | 32.70 |     |       | 21                | 30.67 |
| 73.0       | 11  | 31.55 | 14  | 13.68 | 11  | 48.21 | 21  | 00.40 | 25  | 41.80 | 21  | 40.66 |     |       | 21                | 38.13 |
| 74.0       | 11  | 37.45 | 14  | 22.19 | 11  | 52.49 | 21  | 11.71 | 25  | 57.03 | 21  | 48.65 |     |       | 21                | 45.55 |
| 75.0       | 11  | 43.26 | 14  | 30.67 | 11  | 56.78 | 21  | 22.90 | 26  | 12.23 | 21  | 56.67 |     |       | 21                | 52.92 |
| 76.0       | 11  | 49.01 | 14  | 39.12 | 12  | 01.09 | 21  | 33.98 | 26  | 27.38 | 22  | 04.71 |     |       | 22                | 00.24 |
| 77.0       | 11  | 54.68 | 14  | 47.54 | 12  | 05.41 | 21  | 44.93 | 26  | 42.49 | 22  | 12.78 |     |       | 22                | 07.49 |
| 78.0       | 12  | 00.27 | 14  | 55.93 | 12  | 09.75 | 21  | 55.76 | 26  | 57.56 | 22  | 20.88 |     |       | 22                | 14.67 |
| 79.0       | 12  | 05.79 | 15  | 04.28 | 12  | 14.09 | 22  | 06.47 | 21  | 12.59 | 22  | 28.99 |     |       | 22                | 21.77 |
| 80.0       | 12  | 11.23 | 15  | 12.60 | 12  | 18.45 | 22  | 17.05 | 27  | 27.57 | 22  | 37.13 |     |       | 22                | 28.78 |
| 81.0       | 12  | 16.60 | 15  | 20.89 | 12  | 22.81 | 22  | 27.51 | 27  | 42.51 | 22  | 45.29 |     |       | 22                | 35.69 |
| 82.0       | 12  | 21.88 | 15  | 29.15 | 12  | 27.19 | 22  | 37.84 | 27  | 57.40 | 22  | 53.47 |     |       | 22                | 42.50 |
| 83.0       | 12  | 27.10 | 15  | 37.37 | 12  | 31.57 | 22  | 48.05 | 28  | 12.24 | 23  | 01.66 |     |       | 22                | 49.20 |

续表

| 震中距<br>(°) | P   |       | PP  |       | PcP |       | S   |       | SS  |       | ScS |       | ScP |   | SKS <sub>ac</sub> |       |
|------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|---|-------------------|-------|
|            | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s     | min | s | min               | s     |
| 84.0       | 12  | 32.23 | 15  | 45.55 | 12  | 35.96 | 22  | 58.12 | 28  | 27.04 | 23  | 09.87 |     |   | 22                | 55.78 |
| 85.0       | 12  | 37.28 | 15  | 53.71 | 12  | 40.35 | 23  | 08.07 | 28  | 41.79 | 23  | 18.09 |     |   | 23                | 02.26 |
| 86.0       | 12  | 42.26 | 16  | 01.82 | 12  | 44.75 | 23  | 17.88 | 28  | 56.49 | 23  | 26.33 |     |   | 23                | 08.62 |
| 87.0       | 12  | 47.16 | 16  | 09.91 | 12  | 49.16 | 23  | 27.56 | 29  | 11.14 | 23  | 34.58 |     |   | 23                | 14.88 |
| 88.0       | 12  | 51.96 | 16  | 17.96 | 12  | 53.58 | 23  | 37.10 | 29  | 25.75 | 23  | 42.85 |     |   | 23                | 21.02 |
| 89.0       | 12  | 56.67 | 16  | 25.97 | 12  | 57.99 | 23  | 46.51 | 29  | 40.30 | 23  | 51.12 |     |   | 23                | 27.05 |
| 90.0       | 13  | 01.35 | 16  | 33.95 | 13  | 02.42 | 23  | 55.78 | 29  | 54.81 | 23  | 59.40 |     |   | 23                | 32.98 |
| 91.0       | 13  | 06.00 | 16  | 41.89 | 13  | 06.84 | 24  | 04.91 | 30  | 09.27 | 24  | 07.69 |     |   | 23                | 38.80 |
| 92.0       | 13  | 10.62 | 16  | 49.80 | 13  | 06.84 | 24  | 04.91 | 30  | 09.27 | 24  | 07.69 |     |   | 23                | 44.52 |
| 93.0       | 13  | 15.23 | 16  | 57.67 | 13  | 15.70 | 24  | 22.73 | 30  | 38.03 | 24  | 24.29 |     |   | 23                | 50.14 |
| 94.0       | 13  | 19.81 | 17  | 05.51 | 13  | 20.14 | 24  | 31.47 | 30  | 52.33 | 24  | 32.60 |     |   | 23                | 55.65 |
| 95.0       | 13  | 24.38 | 17  | 13.31 | 13  | 24.57 | 24  | 40.15 | 31  | 06.58 | 24  | 40.92 |     |   | 24                | 01.07 |
| 96.0       | 13  | 28.91 | 17  | 21.07 | 13  | 29.01 | 24  | 48.78 | 31  | 20.78 | 24  | 49.23 |     |   | 24                | 06.40 |
| 97.0       | 13  | 33.41 | 17  | 28.80 | 13  | 33.45 | 24  | 57.33 | 31  | 34.93 | 24  | 57.55 |     |   | 24                | 11.63 |
| 98.0       | 13  | 37.89 | 17  | 36.50 | 13  | 37.89 | 25  | 05.81 | 31  | 49.02 | 25  | 05.88 |     |   | 24                | 16.78 |
| 99.0       | 13  | 42.33 | 17  | 44.15 |     |       | 25  | 14.20 | 32  | 03.07 | 25  | 14.20 |     |   | 24                | 21.83 |

表 1-3 在地幔及外核传播的地震波震相及核幔边界散射波的旅行时间表

| 震中距<br>(°) | P   |       | PP  |       | PcP |   | S <sub>diff</sub> |       | SS  |       | ScS |   | ScP |   | SKS <sub>ac</sub> |       |
|------------|-----|-------|-----|-------|-----|---|-------------------|-------|-----|-------|-----|---|-----|---|-------------------|-------|
|            | min | s     | min | s     | min | s | min               | s     | min | s     | min | s | min | s | min               | s     |
| 100.0      | 13  | 46.77 | 17  | 51.77 |     |   | 25                | 22.52 | 32  | 17.06 |     |   |     |   | 24                | 26.79 |
| 101.0      | 13  | 51.20 | 17  | 59.36 |     |   | 25                | 30.85 | 32  | 31.00 |     |   |     |   | 24                | 31.67 |
| 102.0      | 13  | 55.64 | 18  | 06.91 |     |   | 25                | 39.17 | 32  | 44.88 |     |   |     |   | 24                | 36.46 |
| 103.0      | 14  | 00.08 | 18  | 14.42 |     |   | 25                | 47.49 | 32  | 58.71 |     |   |     |   | 24                | 41.17 |
| 104.0      | 14  | 04.52 | 18  | 21.89 |     |   | 25                | 55.82 | 33  | 12.49 |     |   |     |   | 24                | 45.80 |
| 105.0      | 14  | 08.96 | 18  | 29.33 |     |   | 26                | 04.14 | 33  | 26.21 |     |   |     |   | 24                | 50.35 |
| 106.0      | 14  | 13.40 | 18  | 36.74 |     |   | 26                | 12.46 | 33  | 39.87 |     |   |     |   | 24                | 54.82 |
| 107.0      | 14  | 17.84 | 18  | 44.10 |     |   | 26                | 20.79 | 33  | 53.49 |     |   |     |   | 24                | 59.22 |
| 108.0      | 14  | 22.28 | 18  | 51.44 |     |   | 26                | 29.11 | 34  | 07.05 |     |   |     |   | 25                | 03.54 |
| 109.0      | 14  | 26.72 | 18  | 58.73 |     |   | 26                | 37.43 | 34  | 20.55 |     |   |     |   | 25                | 07.78 |
| 110.0      | 14  | 31.16 | 19  | 05.99 |     |   | 26                | 45.76 | 34  | 34.00 |     |   |     |   | 25                | 11.95 |
| 111.0      | 14  | 35.59 | 19  | 13.21 |     |   | 26                | 54.08 | 34  | 47.40 |     |   |     |   | 25                | 16.05 |
| 112.0      | 14  | 40.03 | 19  | 20.40 |     |   | 27                | 02.40 | 35  | 00.74 |     |   |     |   | 25                | 20.08 |
| 113.0      | 14  | 44.47 | 19  | 27.55 |     |   | 27                | 10.73 | 35  | 14.03 |     |   |     |   | 25                | 24.03 |

续表

| 震中距<br>(°) | P   |       | PP  |       | PcP |   | Sdiff |       | SS  |       | ScS |   | ScP |   | SKS <sub>ac</sub> |       |
|------------|-----|-------|-----|-------|-----|---|-------|-------|-----|-------|-----|---|-----|---|-------------------|-------|
|            | min | s     | min | s     | min | s | min   | s     | min | s     | min | s | min | s | min               | s     |
| 114.0      | 14  | 48.91 | 19  | 34.66 |     |   | 27    | 19.05 | 35  | 27.26 |     |   |     |   | 25                | 27.92 |
| 115.0      | 14  | 53.35 | 19  | 41.74 |     |   | 27    | 27.37 | 35  | 40.44 |     |   |     |   | 25                | 31.74 |
| 116.0      | 14  | 57.79 | 19  | 48.78 |     |   | 27    | 35.70 | 35  | 53.56 |     |   |     |   | 25                | 35.50 |
| 117.0      | 15  | 02.23 | 19  | 55.79 |     |   | 27    | 44.02 | 36  | 06.62 |     |   |     |   | 25                | 39.18 |
| 118.0      | 15  | 06.67 | 20  | 02.75 |     |   | 27    | 52.34 | 36  | 19.63 |     |   |     |   | 25                | 42.80 |
| 119.0      | 15  | 11.11 | 20  | 09.69 |     |   | 28    | 00.67 | 36  | 32.58 |     |   |     |   | 25                | 46.36 |
| 120.0      | 15  | 15.54 | 20  | 16.58 |     |   | 28    | 08.99 | 36  | 45.48 |     |   |     |   | 25                | 49.85 |
| 121.0      | 15  | 20.00 | 20  | 23.44 |     |   | 28    | 17.31 | 36  | 58.32 |     |   |     |   | 25                | 53.28 |
| 122.0      | 15  | 24.42 | 20  | 30.27 |     |   | 28    | 25.64 | 37  | 11.11 |     |   |     |   | 25                | 56.65 |
| 123.0      | 15  | 28.86 | 20  | 37.05 |     |   | 28    | 33.96 | 37  | 23.83 |     |   |     |   | 25                | 59.95 |
| 124.0      | 15  | 33.30 | 20  | 43.80 |     |   | 28    | 42.28 | 37  | 36.51 |     |   |     |   | 26                | 03.19 |

表 1-4 在地幔及地核传播的地震波震相的旅行时间表

| 震中距<br>(°) | PKP <sub>ab</sub> |   | PKP <sub>bc</sub> |   | PKP <sub>df</sub> |       | PP  |       | SKS <sub>ac</sub> |       | SKS <sub>df</sub> |       | SKP |       | SS  |       |
|------------|-------------------|---|-------------------|---|-------------------|-------|-----|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-----|-------|-----|-------|
|            | min               | s | min               | s | min               | s     | min | s     | min               | s     | min               | s     | min | s     | min | s     |
| 111.0      |                   |   |                   |   |                   |       | 19  | 13.21 | 25                | 16.05 | 25                | 48.55 | 22  | 11.82 | 34  | 47.40 |
| 112.0      |                   |   |                   |   |                   |       | 19  | 20.40 | 25                | 20.08 | 25                | 50.46 | 22  | 13.74 | 35  | 00.74 |
| 113.0      |                   |   |                   |   |                   |       | 19  | 27.55 | 25                | 24.03 | 25                | 52.36 | 22  | 15.65 | 35  | 14.03 |
| 114.0      |                   |   |                   |   | 18                | 40.84 | 19  | 34.66 | 25                | 27.92 | 25                | 54.27 | 22  | 17.57 | 35  | 27.26 |
| 115.0      |                   |   |                   |   | 18                | 42.75 | 19  | 41.74 | 25                | 31.74 | 25                | 56.17 | 22  | 19.48 | 35  | 40.44 |
| 116.0      |                   |   |                   |   | 18                | 44.67 | 19  | 48.78 | 25                | 35.50 | 25                | 58.07 | 22  | 21.39 | 35  | 53.56 |
| 117.0      |                   |   |                   |   | 18                | 46.58 | 19  | 55.79 | 25                | 39.18 | 25                | 60.00 | 22  | 23.30 | 36  | 06.62 |
| 118.0      |                   |   |                   |   | 18                | 48.50 | 20  | 02.75 | 25                | 42.80 | 26                | 01.87 | 22  | 25.21 | 36  | 19.63 |
| 119.0      |                   |   |                   |   | 18                | 50.41 | 20  | 09.69 | 25                | 46.36 | 26                | 03.76 | 22  | 27.11 | 36  | 32.58 |
| 120.0      |                   |   |                   |   | 18                | 52.32 | 20  | 16.58 | 25                | 49.85 | 26                | 05.64 | 22  | 29.02 | 36  | 45.48 |
| 121.0      |                   |   |                   |   | 18                | 54.23 | 20  | 23.44 | 25                | 53.28 | 26                | 07.53 | 22  | 30.92 | 36  | 58.32 |
| 122.0      |                   |   |                   |   | 18                | 56.14 | 20  | 30.27 | 25                | 56.65 | 26                | 09.40 | 22  | 32.82 | 37  | 11.11 |
| 123.0      |                   |   |                   |   | 18                | 58.05 | 20  | 37.05 | 25                | 59.95 | 26                | 11.27 | 22  | 34.71 | 37  | 23.83 |
| 124.0      |                   |   |                   |   | 18                | 59.96 | 20  | 43.80 | 26                | 03.19 | 26                | 13.14 | 22  | 36.60 | 37  | 36.51 |
| 125.0      |                   |   |                   |   | 19                | 01.86 | 20  | 50.52 | 26                | 06.38 | 26                | 14.99 | 22  | 38.49 | 37  | 49.12 |
| 126.0      |                   |   |                   |   | 19                | 03.76 | 20  | 57.20 | 26                | 09.50 | 26                | 16.84 | 22  | 40.37 | 38  | 01.68 |
| 127.0      |                   |   |                   |   | 19                | 05.66 | 21  | 03.84 | 26                | 12.56 | 26                | 18.69 | 22  | 42.24 | 38  | 14.18 |
| 128.0      |                   |   |                   |   | 19                | 07.55 | 21  | 10.44 | 26                | 15.56 | 26                | 20.52 | 22  | 44.11 | 38  | 26.63 |
| 129.0      |                   |   |                   |   | 19                | 09.44 | 21  | 17.01 | 26                | 18.51 | 26                | 22.34 | 22  | 45.98 | 38  | 39.02 |

续表

| 震中距<br>(°) | PKP $ab$ |       | PKP $bc$ |       | PKP $df$ |       | PP  |       | SKS $ac$ |       | SKS $df$ |       | SKP |       | SS  |       |
|------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-----|-------|----------|-------|----------|-------|-----|-------|-----|-------|
|            | min      | s     | min      | s     | min      | s     | min | s     | min      | s     | min      | s     | min | s     | min | s     |
| 130.0      |          |       |          |       | 19       | 11.33 | 21  | 23.55 | 26       | 21.40 | 26       | 24.15 | 22  | 34.73 | 38  | 51.35 |
| 131.0      |          |       |          |       | 19       | 13.21 | 21  | 30.04 | 26       | 24.23 | 26       | 25.95 | 22  | 38.46 | 39  | 03.62 |
| 132.0      |          |       |          |       | 19       | 15.09 | 21  | 36.50 | 26       | 27.00 | 26       | 27.73 | 22  | 42.02 | 39  | 15.84 |
| 133.0      |          |       |          |       | 19       | 16.96 | 21  | 42.93 | 26       | 29.72 | 26       | 29.50 | 22  | 45.46 | 39  | 28.00 |
| 134.0      |          |       |          |       | 19       | 18.82 | 21  | 49.31 | 26       | 32.38 | 26       | 31.25 | 22  | 48.79 | 39  | 40.10 |
| 135.0      |          |       |          |       | 19       | 20.68 | 21  | 55.66 | 26       | 34.98 | 26       | 32.99 | 22  | 52.01 | 39  | 52.15 |
| 136.0      |          |       |          |       | 19       | 22.52 | 22  | 01.98 | 26       | 37.53 | 26       | 34.71 | 22  | 55.14 | 40  | 04.14 |
| 137.0      |          |       |          |       | 19       | 24.36 | 22  | 08.25 | 26       | 40.03 | 26       | 36.41 | 22  | 58.19 | 40  | 16.06 |
| 138.0      |          |       |          |       | 19       | 26.19 | 22  | 14.50 | 26       | 42.47 | 26       | 38.08 | 23  | 01.14 | 40  | 27.94 |
| 139.0      |          |       |          |       | 19       | 28.00 | 22  | 20.70 | 26       | 44.86 | 26       | 39.74 | 23  | 04.02 | 40  | 39.75 |
| 140.0      |          |       |          |       | 19       | 29.80 | 22  | 26.87 | 26       | 47.19 | 26       | 41.37 | 23  | 05.78 | 40  | 51.50 |
| 141.0      |          |       |          |       | 19       | 31.59 | 22  | 33.00 | 26       | 49.47 | 26       | 42.98 | 23  | 07.49 | 41  | 03.20 |
| 142.0      |          |       |          |       | 19       | 33.36 | 22  | 39.10 | 26       | 51.69 | 26       | 44.56 | 23  | 09.17 | 41  | 14.84 |
| 143.0      |          |       |          |       | 19       | 35.12 | 22  | 45.15 | 26       | 53.86 | 26       | 46.11 | 23  | 10.84 | 41  | 26.42 |
| 144.0      |          |       |          |       | 19       | 36.85 | 22  | 51.17 | 26       | 55.98 | 26       | 47.63 | 23  | 12.47 | 41  | 37.94 |
| 145.0      | 19       | 37.74 | 19       | 37.62 | 19       | 38.57 | 22  | 57.16 |          |       | 26       | 49.13 | 23  | 14.08 | 41  | 49.40 |
| 146.0      | 19       | 41.54 | 19       | 40.79 | 19       | 40.26 | 23  | 03.11 |          |       | 26       | 50.59 | 23  | 15.66 | 42  | 00.80 |
| 147.0      | 19       | 45.45 | 19       | 43.78 | 19       | 41.93 | 23  | 09.02 |          |       | 26       | 52.02 | 23  | 17.21 | 42  | 12.14 |
| 148.0      | 19       | 49.45 | 19       | 46.63 | 19       | 43.57 | 23  | 14.89 |          |       | 26       | 53.41 | 23  | 18.73 | 42  | 23.42 |
| 149.0      | 19       | 53.50 | 19       | 49.36 | 19       | 45.18 | 23  | 20.73 |          |       | 26       | 54.77 | 23  | 20.22 | 42  | 34.65 |
| 150.0      | 19       | 57.61 | 19       | 51.98 | 19       | 46.77 | 23  | 26.53 |          |       | 26       | 56.10 | 23  | 21.67 | 42  | 45.81 |
| 151.0      | 20       | 01.76 | 19       | 54.49 | 19       | 48.31 | 23  | 32.29 |          |       | 26       | 57.39 | 23  | 23.08 | 42  | 56.91 |
| 152.0      | 20       | 05.94 | 19       | 56.92 | 19       | 49.83 | 23  | 38.01 |          |       | 26       | 58.64 | 23  | 24.46 | 43  | 07.96 |
| 153.0      | 20       | 10.16 | 19       | 59.25 | 19       | 51.30 | 23  | 43.70 |          |       | 26       | 59.85 | 23  | 25.79 | 43  | 18.94 |
| 154.0      | 20       | 14.40 | 20       | 01.49 | 19       | 52.74 | 23  | 49.35 |          |       | 27       | 01.03 | 23  | 27.09 | 43  | 29.86 |
| 155.0      | 20       | 18.66 | 20       | 03.64 | 19       | 54.13 | 23  | 54.96 |          |       | 27       | 02.16 | 23  | 28.35 | 43  | 40.72 |
| 156.0      | 20       | 22.95 |          |       | 19       | 55.49 | 24  | 00.54 |          |       | 27       | 03.26 | 23  | 29.56 | 43  | 51.52 |
| 157.0      | 20       | 27.26 |          |       | 19       | 56.79 | 24  | 06.08 |          |       | 27       | 04.31 | 23  | 30.73 | 44  | 02.26 |
| 158.0      | 20       | 31.58 |          |       | 19       | 58.06 | 24  | 11.57 |          |       | 27       | 05.32 | 23  | 31.86 | 44  | 12.93 |
| 159.0      | 20       | 35.92 |          |       | 19       | 59.27 | 24  | 17.04 |          |       | 27       | 06.29 | 23  | 32.94 | 44  | 23.55 |
| 160.0      | 20       | 40.27 |          |       | 20       | 00.43 | 24  | 22.46 |          |       | 27       | 07.22 | 23  | 33.97 | 44  | 34.10 |
| 161.0      | 20       | 44.64 |          |       | 20       | 01.55 | 24  | 27.84 |          |       | 27       | 08.11 | 23  | 34.96 | 44  | 44.59 |
| 162.0      | 20       | 49.01 |          |       | 20       | 02.61 | 24  | 33.19 |          |       | 27       | 08.95 | 23  | 35.90 | 44  | 55.02 |
| 163.0      | 20       | 53.39 |          |       | 20       | 03.62 | 24  | 38.50 |          |       | 27       | 09.75 | 23  | 36.79 | 45  | 05.38 |
| 164.0      | 20       | 57.79 |          |       | 20       | 04.58 | 24  | 43.77 |          |       | 27       | 10.50 | 23  | 37.64 | 45  | 15.68 |

续表

| 震中距<br>(°) | PKP <sub>ab</sub> |       | PKP <sub>bc</sub> |   | PKP <sub>df</sub> |       | PP  |       | SKS <sub>ac</sub> |   | SKS <sub>df</sub> |       | SKP |       | SS  |       |
|------------|-------------------|-------|-------------------|---|-------------------|-------|-----|-------|-------------------|---|-------------------|-------|-----|-------|-----|-------|
|            | min               | s     | min               | s | min               | s     | min | s     | min               | s | min               | s     | min | s     | min | s     |
| 165.0      | 21                | 02.19 |                   |   | 20                | 05.48 | 24  | 49.00 |                   |   | 27                | 11.21 | 23  | 38.43 | 45  | 25.92 |
| 166.0      | 21                | 06.60 |                   |   | 20                | 06.32 | 24  | 54.19 |                   |   | 27                | 11.88 | 23  | 39.18 | 45  | 36.09 |
| 167.0      | 21                | 11.01 |                   |   | 20                | 07.11 | 24  | 59.35 |                   |   | 27                | 12.50 | 23  | 39.87 | 45  | 46.20 |
| 168.0      | 21                | 15.43 |                   |   | 20                | 07.85 | 25  | 04.46 |                   |   | 27                | 13.07 | 23  | 40.52 | 45  | 56.24 |
| 169.0      | 21                | 19.85 |                   |   | 20                | 08.53 | 25  | 09.53 |                   |   | 27                | 13.60 | 23  | 41.11 | 46  | 06.22 |
| 170.0      | 21                | 24.28 |                   |   | 20                | 09.15 | 25  | 14.56 |                   |   | 27                | 14.09 | 23  | 41.66 | 46  | 16.13 |
| 171.0      | 21                | 28.71 |                   |   | 20                | 09.71 | 25  | 19.56 |                   |   | 27                | 14.53 | 23  | 42.15 | 46  | 25.98 |
| 172.0      | 21                | 33.14 |                   |   | 20                | 10.21 | 25  | 24.52 |                   |   | 27                | 14.92 | 23  | 42.59 | 46  | 35.76 |
| 173.0      | 21                | 37.57 |                   |   | 20                | 10.66 | 25  | 29.44 |                   |   | 27                | 15.27 | 23  | 42.98 | 46  | 45.47 |
| 174.0      | 21                | 42.01 |                   |   | 20                | 11.04 | 25  | 34.32 |                   |   | 27                | 15.57 | 23  | 43.32 | 46  | 55.12 |
| 175.0      | 21                | 46.45 |                   |   | 20                | 11.37 | 25  | 39.15 |                   |   | 27                | 15.83 | 23  | 43.61 | 47  | 04.69 |
| 176.0      | 21                | 50.89 |                   |   | 20                | 11.64 | 25  | 43.91 |                   |   | 27                | 16.04 | 23  | 43.84 | 47  | 14.20 |
| 177.0      |                   |       |                   |   | 20                | 11.85 | 25  | 48.64 |                   |   | 27                | 16.20 | 23  | 44.03 | 47  | 23.65 |
| 178.0      |                   |       |                   |   | 20                | 12.00 | 25  | 53.34 |                   |   | 27                | 16.31 | 23  | 44.16 | 47  | 33.02 |
| 179.0      |                   |       |                   |   | 20                | 12.09 | 25  | 58.03 |                   |   | 27                | 16.38 | 23  | 44.23 | 47  | 42.33 |
| 180.0      |                   |       |                   |   | 20                | 12.12 | 26  | 02.70 |                   |   | 27                | 16.41 | 23  | 44.26 | 47  | 51.56 |

地壳是地球最外面的一层，一般厚 33km（大陆）或 7km（海洋）。地壳分为上下两层，其间是康拉德面，在 10km 左右。上部地壳只在大陆有，海洋基本缺失。上部地壳主要为花岗岩层，下部地壳主要为玄武岩层。地壳厚度的横向变化非常大，在洋中脊附近，由于是地壳的诞生地，因而地壳很薄，只有几千米厚。随着距洋中脊距离的增大，地壳也随之增厚，造山带的地壳最厚，例如具有“世界屋脊”之称的青藏高原的地壳可达近 80km，是全球地壳平均厚度（33km）的两倍多。

介于地壳和地核之间的部分是地幔，平均厚度为 2870km 左右。地幔也分为上、下两层，地幔内部的 B、C 两层构成上地幔，上、下地幔之间的分界面在 1000km 左右。

另外在上地幔内部（60～250 km）存在一个地震波的低速层，地震波速比上部减少 5%～10%，这表明此处岩石强度较低，可能局部熔融。低速层的上下并没有明显的界面，地震波速表现为渐变的特征。低速层后来就被命名为软流圈。软流圈以上岩石强度较大的部分（包括地壳和上地幔顶部）称为岩石圈。

地球的中心部分为地核，核幔边界的半径为 3473km 左右。地核又可分为外核和内核。根据对地震波传播速度的测定，外核可能是液态物质，内核则是固体物质。地核的物质成分同铁陨石相似，所以有时又称“铁镍核心”。

## 第二节 地震波及其分类

1849 年英国科学家斯托克斯 (G. H. Stokes) 证实地震时产生两种弹性波, 一种是压缩波或膨胀波, 其质点振动方向与传播方向一致, 称为纵波; 另一种是剪切波, 其质点振动方向与传播方向垂直, 称为横波。由于纵波和横波都是在物体内部传播, 因此, 它们被称之为体波。还有一种地震波只在地球表面或地球内部物理界面附近传播, 称为面波 (图1-3)。

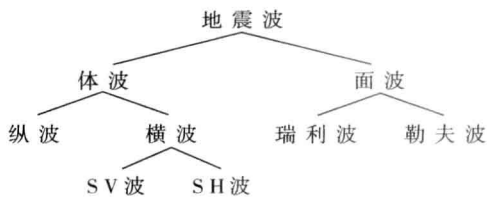


图 1-3 地震波及其分类

我们比较熟悉的波动是水波。当向池塘里扔一块石头时水面被扰乱, 以石头入水处为中心有波纹向外扩展。这个波列是水波附近的水的颗粒运动造成的, 然而水并没有朝着水波传播的方向运动。如果水面浮着一个软木塞, 它将上下浮动, 并不会从原来位置移走。这个扰动由水粒的简单前后运动连续地传下去, 从一个颗粒把运动传给

更前面的颗粒。这样, 水波携带石击打破的水面的能量向池边运移并在岸边激起浪花。地震运动与此相当类似。我们感受到的摇动就是由地震波的能量产生的弹性岩石的震动。

纵波的物理特性恰如声波。声波, 乃至超声波, 都是在空气内由交替的挤压 (推) 和扩张 (拉) 而传递。因为流体 (例如液体、气体) 和固体岩石一样能够被压缩, 因而纵波能在流体 (如海洋和湖泊) 及固体地球中穿过。地震时, 纵波从震源处向四周传播, 通过交替挤压和扩张穿过岩石, 其质点在这些波传播的方向上向前和向后运动, 换句话说, 这些质点的运动是垂直于波前面的。由于这种类型的波首先 (Primary) 到达地表, 因而又称之为 P 波。

对于横波来说, 由于横波通常以续至 (Secndary) 波的形式出现, 因而又被称之为 S 波。地震波在弹性介质与流体介质 (包括空气及液体) 中的传播特征有所不同。在外力的作用下, 流体可以发生压缩或膨胀, 但不能产生剪切, 因而在流体中只有纵波才能通过, 而横波是不能在流体中传播的; 弹性物质在外力的作用下既可以发生压缩或膨胀, 也可以产生剪切与扭动, 因而, 纵波与横波均可在弹性介质中进行传播。因此, 根据纵波和横波这种截然不同的传播特征, 可以研究地球深部流体带的存在。

S 波具有偏振现象。当 S 波穿过地球时, 它们遇到构造不连续界面时会发生折射或反射, 并使其振动方向发生偏振。当发生偏振的 S 波的岩石质点仅在水平面中振动时, 称为 SH 波; 当岩石质点在包含地震波射线的垂直平面里振动时, 这种 S 波称为 SV 波。

当 P 波和 S 波到达地球的自由表面或某一物理界面时, 在一定条件下会产生其他类型地震波, 这些波沿界面传播, 而且质点的振动振幅随深度的增加而逐渐减小, 因而称之为面波。根据质点振动特征, 将其分为勒夫波和瑞利波。

勒夫波是地震面波中最简单的一种类型。它是英国数学家勒夫 (Augustus Edward Hough Love) 于 1911 年首次发现并进行描述的, 因而称之为勒夫波。勒夫波的质点运动类似 SH 波, 运动没有垂向位移, 质点振动方向垂直于传播方向。相反, 瑞利面波的质点在地震波传播方向上的垂直平面内做逆进的椭圆运动, 于 1885 年首先由英国实验、理论物理学家瑞利 (Lord John William Strutt Rayleigh) 发现, 故命名为瑞利波。勒夫波和瑞