

CAMBRIDGE

Applied Geophysics  
Second Edition

# 应用地球物理 (第二版)

[英] W.M.Telford L.P.Geldart R.E.Sheriff 著  
陈石 孙少波 高志亮 卞龙 张健 等译



科学出版社

# 应用地球物理

(第二版)

[英] W. M. Telford L. P. Geldart R. E. Sheriff 著

陈石 孙少波 高志亮 卞龙 张健等译

科学出版社

北京

图字:01-2009-0230号

## 内 容 简 介

本书是地球物理专业的经典教材之一,全书共分十二章系统地介绍了应用地球物理学的各个分支方法。内容涵盖:重、磁、电、震、放射性和地球物理测井等常用的地球物理方法技术。书中不但对各种地球物理理论和方法进行了通俗易懂的讲述,而且还详细地介绍了常用仪器的结构和原理。此外,本书还包含了大量的实际工程和科研案例及数据,同时配有丰富的课后思考练习题,适合读者循序渐进式学习,从实际资料中获取经验,通过思考练习中深化对问题本质的认识。

本书重点侧重于介绍应用地球物理学的基本方法原理,适用于作为地球物理专业基础课程教材,也可作为地球物理相关专业和研究人员的参考书。

*Applied Geophysics*, second edition (0-521-33938-3) by W. M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff first published by Cambridge University Press 1990

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Science Press Ltd. 2011

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Science Press Ltd.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

应用地球物理/(英)特尔福德(Telford, W. M.)等著;陈石等译.—2版.—北京:科学出版社,2011  
ISBN 978-7-03-031586-1

I. 应… II. ①特…②陈… III. ①地理物理勘探-高等学校-教材 IV. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 113206 号

责任编辑:韦 沁 罗 吉 / 责任校对:林青梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年6月第一次印刷 印张:54

印数:1—2 500 字数:1 266 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 译者名单

陈	石	孙少波	高志亮	卞 龙
张	健	高 翔	刘博研	于靖波
李	真	马 干	孟令媛	刘宝静
张	扬	孟 林	林 巍	王超凡

David A. Keys 博士是本书第一版的第四作者,于 1978 年去世。他也是《找矿应用地球物理》(*Applied Geophysics in the Search for Minerals*)一书的作者之一,该书是他与 Eve 博士共同编著的,于 1929 年第一次出版,成为应用地球物理领域最早的教科书之一。该书经历了四个版本的修改,服务了几代地球物理学家。20 世纪 60 年代中期,Keys 博士建议由经验丰富的作者共同合作,准备第五版的出版,并采用简短的书名《应用地球物理》(*Applied Geophysics*),这是一本全新的应用地球物理专著。

Keys 博士在他的合作者中有很大的影响力,广受大家的尊重。本书的两位作者(Telford 博士和 Geldart 博士)在加拿大 McGill 大学认识了他。之后,他成为位于乔克里弗的加拿大国家科研委员会主管科学事务的副主席。

我们对公司、个人以及提供信息与插图的出版者表示敬意。特别地,我们希望把诚挚的祝福送给 Jerry Roth 先生、Alex Becker 先生和 Bill Gore 先生,他们分别在第 3、5~10、11 章的准备工作中给予了很有价值的帮助。我们也特别感激 J. E. Riddell 先生,他提供了他在矿产资源勘探领域 35 年工作经验中的很多实例。

W. M. Telford

L. P. Geldart

R. E. Sheriff

1990 年 6 月

## 译者前言

《应用地球物理》(Applied Geophysics)(第二版)是由 W. M. Telford、L. R. Geldart 和 R. E. Sheriff 编著的系统性地球物理方面的经典专著,1990 年由英国剑桥大学出版社出版,2002 年英国剑桥大学出版社再版。

应用地球物理学是地球科学的前沿与先导性分支科学,它依据物理学的理论原理,研究能源、资源勘查与开发、预测和防治地质灾害、保护生态环境以及监测污染等的重要方法,从而推动社会进步和经济发展。其重、磁、电、震、热、放射性等是寻找石油、天然气、煤、金属、非金属矿产及地下水的重要而有效的应用地球物理技术,支持着许多与资源(能源)勘探开发有关的重要产业部门。近年来其应用领域又扩展到地质工程、工程勘察、环境监测、油藏动态监测等方面,并促使数学、信息科学、材料科学向地球科学渗透并迅速发展。

这本书作为科研院所、大专院校地球物理和相关专业本科生的专业基础课教材,研究生的重要的参考书,读者可以在应用地球物理的基本理论、方法技术、仪器结构、资料解释和课后练习等方面得到基本训练。全书第 1 章为引言;第 2~4 章分别介绍重力法、磁法、地震法;第 5 章涉及岩石和矿物的电学性质;第 6 章介绍天然场源方法;第 7~9 章分别介绍电磁法、电阻率法以及激发极化法;第 10 章介绍放射性方法;第 11 章涉及地球物理测井的常用方法;第 12 章讨论了综合地球物理问题,最后是附录。为便于非地球物理专业学生在学习地球物理学中很好地理解书中数学公式和物理意义,在翻译中贴近原著的前提下,尽可能通俗易懂,因而,也是非地球物理专业师生们很好的教学参考书。

这里要强调的是,在翻译过程中中国科学院研究生院的研究生们发挥了主力军的作用,翻译花费了各位师生大量的时间和精力,大家都出色地完成了任务。最后,在本书即将出版之际,特别要感谢长安大学数字油田研究所为本书的出版提供了大力支持与资助,谨表谢忱。

张 健

2011 年 4 月 26 日

## 第二版序言

自从写作《应用地球物理》(*Applied Geophysics*) (第一版)以来,14年的光阴转瞬即逝。其间,出现了新的观测仪器、广泛应用的计算机技术以及更全面的矿藏成因知识。然而,应用地球物理内部各领域的发展并不一致。在重力勘探中,除了直升机和惯性导航系统的应用外,其他方面基本没有变化,包括复杂模型重力场的计算、利用观测场的差异修改模型以及明显改变重力解释结果的迭代计算等。质子旋进磁力仪和光泵磁力仪灵敏度的巨大提高以及梯度仪的应用,大大增加了从磁测数据中提取有意义磁异常的数量。同重力解释一样,迭代解释对磁异常也有重大的影响。没有一个单项革新像组合检波器的改进那样影响到地震勘探,组合检波器在迄今为止的时代里最大限度地提高了地震观测数据的质量。改进的地震数据质量可以产生新的解释方法(如地震地层学),并促进交互解释的发展。自然电位法几乎没有变化,而大地电磁法则由单纯的研究工具发展为一种实际的勘探方法。电阻率法只有少许变化,但也许来自一系列新的电磁法在任何领域的发展就是其最大的变化。激发极化法受益于仪器性能和解释概念的巨大进步。航空放射性法的应用进一步扩展到浅层填图和矿产普查。地球物理测井法的最大变化来自提取新信息的几种不同类测井组合。

我们努力去应付这些变化。当然,许多基本理论保留不变,我们只是尝试把它们表达得更清楚。在本书中,对目前勘探中不断萎缩的方法做了适当的删减,对其他部分则做了扩充和介绍,以覆盖当前的发展和变化。

L. P. Geldart 博士是全书的总编辑。资深作者 W. M. Telford 博士又一次作为第 5~10、12 章的编辑,L. P. Geldart 博士和 R. E. Sheriff 博士为第 4 章的编辑,R. E. Sheriff 博士为第 11 章的编辑,他们共同为第 2、3 章的编写作出了巨大的贡献。

W. M. Telford

L. P. Geldart

R. E. Sheriff

1990年1月

## 第一版序言摘录

本书最初由 Eve 博士和 Keys 博士编著的教材《找矿应用地球物理》(*Applied Geophysics in the Search for Minerals*)改编而成。然而,由于过去 20 多年里勘探地球物理在野外仪器更新和工作实践以及资料解释技术上的巨大进步,最初的修订本已经不实用,需要一本完整的全新教材。

应用地球物理的读者通常具有较强的物理或地质学科的背景,但一般不会两者都具备。考虑到此,本书既可使物理学家能得到简单物理概念的详细解释(如能量密度)和数学公式的分步推导,也使地质学家能从简单地质实例的定量分析和基本概念的详细描述中获取乐趣。

由 Eve 博士和 Keys 博士所著的教材《找矿应用地球物理》是无与伦比的,书中特意挑选了一些问题供课堂使用。这种特点在本书中也保留下来。

W. M. Telford

L. P. Geldart

R. E. Sheriff

D. A. Keys

1974 年 11 月



# 数学符号

## 常用函数

$f(x, y, z)$	具有连续变量 $(x, y, z)$ 的函数
$f_t$	离散变量 $t = n\Delta$ 的函数。其中, $n$ 为整数
$f(t) * g(t)$	$f(t)$ 与 $g(t)$ 的卷积
$G(\nu), G(\omega)$	$g(t)$ 的傅里叶变换
$\Phi_{fg}(\tau)$	位移为 $\tau$ 时 $f(t)$ 与 $g(t)$ 的相关函数
$J_n(x)$	$n$ 阶第一类柱贝塞尔函数
$I_n(x)$	第一类修正的柱贝塞尔函数
$K_n(x)$	第二类修正的柱贝塞尔函数

## 特殊函数

$u(t)$	单位阶跃函数: $u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ +1, & t > 0 \end{cases}$
$\delta(t), \delta_t$	单位脉冲(狄拉克 $\delta$ 分布函数)。 $\delta(t) = \delta_t = \begin{cases} +1, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$
boxcar( $t$ )	$\text{boxcar}(t) = \begin{cases} +1, & -\omega_0 \leq \omega \leq +\omega_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$
comb( $t$ )	等间距单位脉冲的无穷级数
sinc( $t$ )	$(\sin t)/t$

## 常用符号

$>, <$	大于, 小于
$\geq, \leq$	大于或等于, 小于或等于
$\ll, \gg$	远小于, 远大于
$\sim$	范围
$\approx$	约等于
$\leftrightarrow$	一个函数与它的变形之间的一致符号
$\mathbf{A}$	模为 $\mathbf{A}$ 的向量
$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$	矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 的点乘标量积

$\mathbf{A} \times \mathbf{B}$	矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 的叉乘矢量结果
$\nabla$	矢量运算符 $i\partial/\partial x + j\partial/\partial y + k\partial/\partial z$
$\nabla^2$	拉普拉斯算子 $\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$
$\nabla\varphi$	函数 $\varphi(x, y, z)$ 的梯度, 等于 $\mathbf{grad}\varphi$ [式(A17)]
$\nabla \cdot \mathbf{A}$	函数 $\mathbf{A}(x, y, z)$ 的散度, 等于 $\text{div}\mathbf{A}$ [式(A19)]
$\nabla \times \mathbf{A}$	函数 $\mathbf{A}(x, y, z)$ 的旋度, 等于 $\mathbf{curl}\mathbf{A}$ [式(A20)]
$\mathbf{A}$	分量 $a_{ij}$ 的矩阵
$\mathbf{A}^T$	$\mathbf{A}$ 的转置矩阵
$\mathbf{A}^{-1}$	$\mathbf{A}$ 的逆
$ x $	$x$ 的绝对值
$\det(a_{ij})$	分量 $a_{ij}$ 的行列式
$\sum_0^n g_i$	$g_0 + g_1 + g_2 + \cdots + g_n$
$\sum_{k=0}^n g_k$	$g_0 + g_1 + g_2 + \cdots + g_n$
$\sum_k g_k$	对于适当的 $k$ 值, 对 $g_k$ 求和
$\ln x$	$\log_e x$
$\lg x$	$\log_{10} x$
$U_{xx}, U_{xy}, U_{zzz}$	分别相对于 $x$ (2次)、 $x$ 和 $y, z$ (3次) 的偏导数
$j$	$\sqrt{-1}$
$\text{Re}[f(z)]$	复数 $f(z)$ 的实部
$\text{Im}[f(z)]$	复数 $f(z)$ 的虚部

# 目 录

译者前言

第二版序言

第一版序言摘录

数学符号

第 1 章 引言	1
参考文献	5
第 2 章 重力法	6
2.1 引言	6
2.2 重力原理	7
2.3 地球的重力	11
2.4 重力仪器	21
2.5 野外工作	26
2.6 重力数据处理	29
2.7 重力解释	37
2.8 野外实例	52
2.9 习题	56
参考文献	67
第 3 章 磁法	69
3.1 引言	69
3.2 原理和初步理论	70
3.3 地球磁场	75
3.4 磁法的场地设备	84
3.5 工作区域场	90
3.6 常规形状的磁力效应	95
3.7 处理和解释	118
3.8 野外实例	129
3.9 习题	137
参考文献	148
第 4 章 地震法	151
4.1 引言	151
4.2 地震理论	155
4.3 地震波路径几何学	182

4.4	地震同相轴的特征 .....	199
4.5	反射波野外方法和设备 .....	211
4.6	折射波野外方法和设备 .....	237
4.7	数据处理 .....	242
4.8	石油勘探中一些基本地质概念 .....	265
4.9	折射波解释 .....	268
4.10	反射波解释 .....	277
4.11	特殊方法 .....	299
4.12	习题 .....	308
	参考文献 .....	315
<b>第5章</b>	<b>岩石和矿物的电学性质 .....</b>	<b>321</b>
5.1	电法的分类 .....	321
5.2	岩石和矿物的电学性质 .....	321
5.3	岩石和矿物的电性测定 .....	326
5.4	岩石和矿物的电性常数典型值 .....	327
	参考文献 .....	333
<b>第6章</b>	<b>天然场源方法 .....</b>	<b>334</b>
6.1	自然电位法 .....	334
6.2	大地电流法和大地电磁法 .....	343
6.3	野外实例 .....	369
6.4	习题 .....	376
	参考文献 .....	383
<b>第7章</b>	<b>电磁法 .....</b>	<b>385</b>
7.1	介绍和历史背景 .....	385
7.2	电磁法理论 .....	385
7.3	EM 仪器 .....	407
7.4	对地勘测的 EM 场系统 .....	411
7.5	航空 EM 系统 .....	426
7.6	电磁法的野外工作流程 .....	432
7.7	数据解释 .....	433
7.8	野外实例 .....	530
7.9	习题 .....	554
	参考文献 .....	572
<b>第8章</b>	<b>电阻率法 .....</b>	<b>577</b>
8.1	引言 .....	577
8.2	基本理论 .....	577
8.3	非均匀地层的影响 .....	583
8.4	电阻率法野外工作装备 .....	589

---

8.5	电极布置和野外方法	591
8.6	解释	597
8.7	野外实例	625
8.8	习题	630
	参考文献	640
<b>第9章</b>	<b>激发极化法</b>	<b>641</b>
9.1	引言	641
9.2	激发极化效应的源	642
9.3	激发极化测量	645
9.4	IP野外操作	650
9.5	解释	659
9.6	野外实例	670
9.7	习题	673
	参考文献	680
<b>第10章</b>	<b>放射性方法</b>	<b>682</b>
10.1	引言	682
10.2	放射性基本原理	683
10.3	仪器	694
10.4	野外操作	703
10.5	数据解释	704
10.6	野外实例	708
10.7	习题	712
	参考文献	720
<b>第11章</b>	<b>地球物理测井</b>	<b>721</b>
11.1	引言	721
11.2	电阻率方法	725
11.3	自然电位(SP)测井	733
11.4	地层倾角测井仪	738
11.5	电磁波传播方法	742
11.6	感应极化测井	745
11.7	弹性波(声波)方法	745
11.8	核方法	753
11.9	重力、磁法和地热方法	765
11.10	测井解释	767
11.11	油田的例子	768
11.12	习题	776
	参考文献	784

---

<b>第 12 章 综合地球物理问题</b> .....	786
12.1 引言 .....	786
12.2 习题 .....	787
参考文献 .....	814
<b>附录 A 数学基础</b> .....	815
<b>附录 B 定位</b> .....	839
参考文献 .....	845

# 第1章 引言

地球物理学像它自身表明的那样是用物理学方法研究地球及其周围空间的。吉尔伯特(Gilbert)发现地球周围存在较强而且不规则的磁场,牛顿万有引力定律的发现可以看做地球物理学的开端。找矿和对金属的寻找始于远古时代,但是科学性记录从1556年Georgius Agricola著名论文*De re metallic*的出版开始,这是长期以来第一篇关于采矿的权威性论著。应用地球物理学方法寻找矿藏开始于1843年,当时Von Wrede指出Lamont使用的测量地球磁场变化的磁经纬仪也许可以用于发现磁性矿体。然而,这个想法直到1879年Robert Thalen教授的*On the Examination of Iron Ore Deposits by Magnetic Methods*一书出版后才付诸实际。当时瑞典的Thalén-Tiberg磁力仪和后来的Thomson-Thalén仪器可以用来确定地下磁性岩脉的走向、倾角和深度。

20世纪末期,人类对石油产品和各种金属矿藏的需求急剧扩展,导致了許多地球物理技术的发展,以便人们能更有效地检测和发现隐伏矿藏及其构造。特别是在第二次世界大战后,由于测量仪器的改进和数字计算机被广泛地应用到地球物理数据的处理和解释之中,地球物理技术发展更为迅猛。

由于绝大多数的矿床隐伏于地表之下,所以,只能依靠矿床与围岩之间的物性差异来探查。基于岩石弹性差异的地球物理方法已经广泛应用于寻找和油气相关的构造之中。例如,地表之下数公里的断层、背斜和向斜构造。

地球内部电导率和自然电位的差异,插入地下的人工源电位的衰减率,局部重磁和放射性异常变化,所有这些提供了地下地质构造的相关信息,使地球物理学家可以确定合适的位置来寻找矿床聚集区。

在两次世界大战中,一些基于上述方法的仪器曾被地球物理学家们用于定位火炮掩体、潜艇和战机等。在第一次世界大战中,人们试图通过测量大炮发射时后坐力在地球中产生的弹性波的到达时间来判断火炮的位置,这直接导致了地震反射波法的诞生。通过计算声脉冲发出和返回的旅行时,能计算出到目标物体的距离,因此,水下声呐被用于定位潜艇位置。现在声呐已经被广泛用于海洋地球物理调查的导航之中。雷达发展于第二次世界大战之中,类似于声呐的无线电脉冲可用于追踪飞机和战舰的位置。在战争中,战舰、潜艇和水雷也都可以通过其磁性被检测到。

应当指出的是,地球物理方法只能探测不连续性,也就是说,一个地区要与其他地区在某些物理性质上存在足够的差异,才能被探测到。这限定我们探查不到那些自然属性均匀的物质,只能分辨那些在时间、空间上有一些变化的物质。

地球物理学涉及与地球及其大气、空间相关的各种物理学问题。应用无人航天器收集到的地球物理测量数据已经被人们用于研究月球、大气、磁场和其他行星属性。

主要的地球物理领域可以分类如下,它们中的一些已经在科学调查中应用很多年了:

地震学(Seismology);  
 地热学(Thermal properties of the earth);  
 地磁学(Terrestrial magnetism);  
 地电学(Telluric currents);  
 大地测量与重力学(Geodesy and gravitation);  
 大地、海洋和空间的放射性,宇宙射线(Radioactivity of the earth, sea, and atmosphere; cosmic rays);  
 空间电学(Atmospheric electricity);  
 气象学(Meteorology)。

人类对地球的认识来源于以上各个领域的信息综合,应用地球物理调查也是如此。综合多种不同方法有助于我们更准确地确定某一构造或矿藏的位置。纯科学研究,如湖水的蒸发率、不同岩石及溪水和池塘水的化学组成、大地电流的大小、位场变化、大气中的混杂物等,都影响着应用地球物理学中矿藏定位方法的选择。例如,空气或气流中氡的浓度指示含铀矿床,远距离雷电引起的电磁波可以用于定位地下深处的导电矿床。

应用地球物理在寻找金属矿、石油、天然气方面可以被分为以下几种勘探方法:重力法,磁力法,地震法,电法,电磁法,放射性法,测井法,化学、热和其他方法的结合。

金属矿或油气资源通常与某些地质条件有关,矿床常见于大型岩浆活动区,岩浆活动后岩石可能变质也可能不变质。最终该区域被侵蚀到一定程度,矿床接近地表,就很容易被发现并开采。煤是海洋或湖泊附近的植物被快速埋藏的结果,油气通常是由于海洋有机物的沉积并随后被埋藏形成的。金属矿物的寻找集中在火成岩或变质岩区域,如落基山脉、安第斯山脉、阿尔卑斯山脉及乌拉尔山脉。但有时也会产生例外,原因如下:① 矿物由于动力学原因可以从其形成区域发生运移,如砂金,就可能随溶液运移;② 某些矿物如盐和石膏最初是在水溶液中沉积形成的,因此常见于沉积岩区域。寻找煤、油、气则限于沉积盆地,只有极少数例外是油气运移到了火成岩或变质岩区域。

选择什么技术探测某种矿物取决于矿物的性质及其围岩。有时某种方法可以直接指示所寻找的矿物,如用磁法寻找磁铁矿或磁镍矿;而有时一些方法只能指示此地是否可能出现要找寻的矿物,如勘探石油时磁法可以作为确定深度及基底的勘测技术,以确定哪里沉积物足够厚,有可能开发。

表 1.1 按勘探类型和任务统计的 1987 年全球总经费支出 (单位:  $10^3$  美元)

种类	陆地	过渡区	海洋	航空	钻孔	合计
石油勘探	809394	10091	541053	13405	1504	1375447
石油开发	20161	25	9657	32	294	30169
矿物	13076	—	62	13705	58	26901
环境	443	—	—	92	91	626
工程	2100	—	8580	—	235	10914
地热	1095	—	—	—	30	1125
地下水	1505	—	—	—	283	1788
海洋学	—	—	1458	300	—	1758
科研	3217	—	6190	802	184	10393
合计	850990	10116	556999	28336	2679	1459120



用飞机携带磁、电磁及其他仪器进行调查是最快的寻找地球物理异常的方法。这种区域调查方法对于大区域覆盖调查是最便宜的,因此常用于普查,然后用更详细的地面技术对所发现的异常进行调查。地震勘探法是另一种用于陆地和海上大面积勘探的方法,虽然在时间和金钱上的花费都相当大。

表 1.1 给出了 1987 年用于地球物理数据采集的全球总经费支出。总额 15 亿美元的总经费支出中不包括苏联、东欧及中国。该数字只是 1982 年的 30%,并且低于 1977 年以来的所有年份(图 1.1),反映汽油和矿物的价格较低。多数人认为图 1.1 中显示的急剧下降已接近停止,但还没有统计数据支持这一观点。很多人(包括作者)都期待接下来几年用于勘探开发活动的经费支出会逐渐增长。

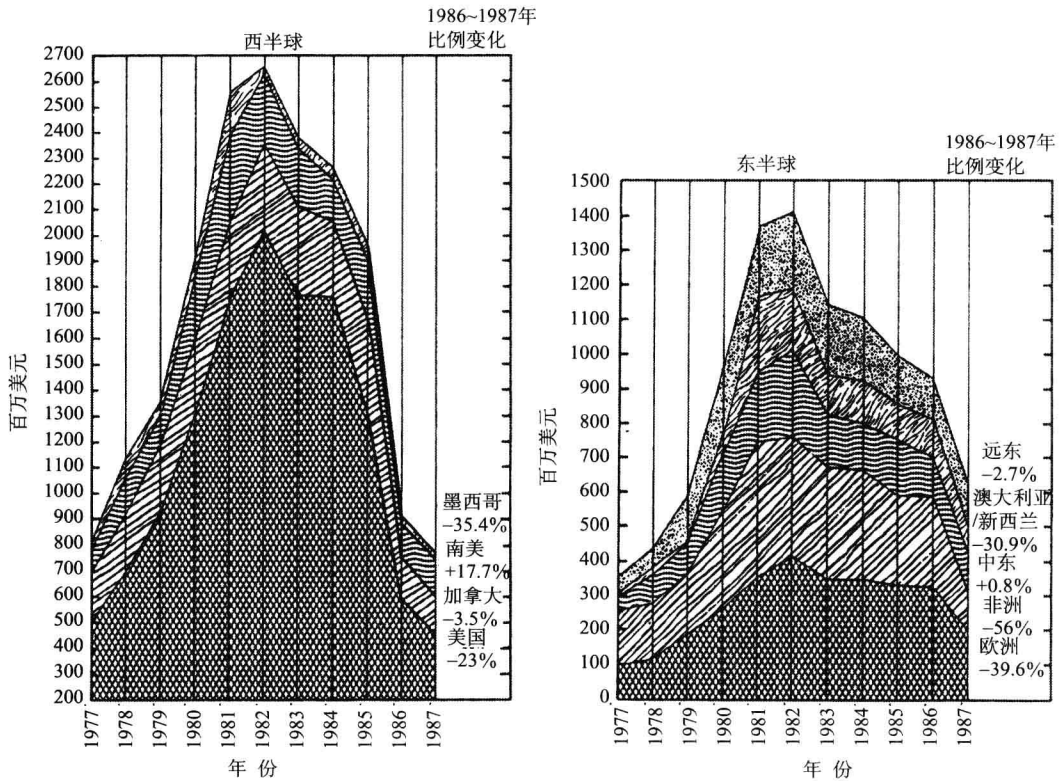


图 1.1 用于石油勘探开发的总经费支出,1977~1987 年 (Senti, 1988)

图 1.1 也显示出地球物理工作地点的主要变动。不同地球物理方法及其勘探单价见表 1.2。成本受多种因素影响,如特定商品供求关系、经济形势、政府调控、技术进步、自然科学研究以及业务环境、勘探时间长短及其性质等。

表 1.2 1987 年的地球物理经费支出和单价成本数据

	成本数据/%	单价/美元	
石油勘探			
陆上地震(二维,P波)	72.1	207×10 <sup>3</sup> /mo	2206/km <sup>2</sup>
过渡带地震	0.4	198	1930 <sup>a</sup>