

当代科学前沿论丛

NEW FRONTIERS OF SCIENCES

地球的结构、演化和动力学

STRUTURE EVOLUTION
AND DYNAMICS OF THE EARTH

主编 张有学 (ZHANG YOUXUE)

尹 安 (YIN AN)



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

当代科学前沿论丛

地球科学
进展与评论

Advances in Earth
Sciences

第一卷
Volume 1

中国地球科学促进会
International Professionals
for the Advancement of
Chinese Earth Sciences

地球的结构、 演化和动力学

STRUTURE, EVOLUTION, AND
DYNAMICS OF THE EARTH

主编 张有学 尹 安

高等教育出版社

内容提要

本书介绍了地球的结构、演化和动力学的一些前沿研究方向和进展。主要内容包括:地震成像原理及其在研究地球内部结构和勘探中的应用,地幔中的相变和矿物学,地核的结构、组成和性质,地质年代学的原理和地球的年龄,造山带的动力学,尤其是重力滑塌,喜马拉雅-西藏造山带的地质演化,以及大洋中脊的动力学。为适应更多的读者,作者对每个课题的介绍尽量深入浅出,对基本原理的解释比较详细,而终点都达到该课题的最新成就并包含作者对未来的展望。

本书可供地质、地球物理、地球化学、勘探、地理、海洋、环境、自然资源等学科领域的研究人员和有关工作人员阅读参考,也可供高等学校相关专业师生用作教学参考书,还适合于对地球和行星科学感兴趣的读者。

图书在版编目(CIP)数据

地球的结构、演化和动力学/张有学 尹安主编.
北京:高等教育出版社,2002.4

本书可供地质、地球物理、地球化学、勘探、地理、
海洋学专业用

ISBN 7-04-010647-7

I. 地… II. ①张…②尹… III. ①地球构造②地球演化③地球动力学 IV. P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 098428 号

地球的结构、演化和动力学

张有学 尹 安 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国农业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

印 张 22.75

版 次 2002 年 4 月第 1 版

字 数 390 000

印 次 2002 年 4 月第 1 次印刷

插 页 6

定 价 49.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

《当代科学前沿论丛》专家委员会

(按姓氏笔画为序)

(国内部分)

王 夔	冯 端	师昌绪	曲钦岳	朱清时
孙 枢	李三立	李大潜	李国杰	杨芙清
吴建屏	邹承鲁	张尧庭	陈 竺	陈佳洱
陈希孺	陈宜瑜	周秀骥	姜伯驹	袁亚湘
钱 易	徐光宪	徐端夫	徐冠华	翟中和
戴立信	戴汝为			

(海外部分)

王中林	文小刚	邓兴旺	田 刚	丛京生
刘 钧	汤 超	许 田	危 岩	严晓海
李 凯	李 明	邱子强	余振苏	范剑青
周午纵	郑元芳	宫 鹏	俞陆平	袁钧瑛
徐希平	程正迪	鄂维南		

主 编 简 介

张有学

1957年生。北京大学地质系地球化学专业毕业(1982)。美国哥伦比亚大学博士(1989)。现美国密西根大学地质科学系副教授。主要研究方向为实验岩石学、火山学、地球化学动力学和地球化学演化。曾主持多项美国自然科学基金会的课题,发表论文37篇。1993年获美国地球化学学会的Clarke奖(美国地球化学学会的年轻科学家奖)。1994年获美国自然科学基金会的年轻科学研究者奖。

尹 安

1959年生。北京大学地质系地质力学专业毕业(1983)。美国南加州大学博士(1988)。现美国加州大学洛杉矶分校地球和行星科学系教授,美国地质学会会员,曾任国际海洋钻探计划评委(1993—1996)。主要研究方向为地球动力学,断层体系的运动学和动力学,北美及亚洲的构造演化。曾主持多项美国自然科学基金会的课题,发表论文49篇。1993—1994年获美国地质学会Donath奖(美国地质学会的年轻科学家奖)。

作 者

陈永顺 (CHEN John Yongshun), College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-5503, USA

费英伟 (FEI Yingwei), Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 20015-1305, USA

高 锐 (GAO Rui), 中国地质科学院地质所, 北京 100037

李朋武 (LI Pengwu), 中国地质科学院地质所, 北京 100037

刘 勉 (LIU Mian), Department of Geological Sciences, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA

彭 聪 (PENG Cong), 中国地质科学院矿产资源所, 北京 100037

宋晓东 (SONG Xiaodong), Department of Geology, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA

许晓霞 (XU Xiaoxia), Department of Geology, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA

尹 安 (YIN An), Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA 90095-156702, USA

张有学 (ZHANG Youxue), Department of Geological Sciences, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-1063, USA

赵大鹏 (ZHAO Dapeng), Department of Earth Sciences, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan

周华伟 (ZHOU Hua-wei), Allied Geophysical Lab, University of Houston, Houston, TX 77204-4231, USA

翻 译 者

戴宝章 南京大学地球科学系, 南京, 210093

李 华 南京大学地球科学系, 南京, 210093

刘绍文 南京大学地球科学系, 南京, 210093

出版者的话

人类创造了科学技术，科学技术推动了人类的文明进程。两者的互动影响，今天已达到了前所未有的程度：人类的经济发展和社会进步的需要，为科学技术迅猛的创新，提供了强大的动力；科学技术的发展，在急剧地改变着人类的思维方式、学习方式、工作方式、生活方式、娱乐方式。科学技术已成为强大的社会生产力和巨大的社会资本。现在，每个国家，每个地区，甚至每个单位，都把科学技术创新、科学技术转化为生产力作为头等大事，抢占科学技术制高点，以此来提高自己的综合实力。

新中国成立 50 多年特别是改革开放 20 多年来，随着经济的蓬勃发展，科学技术得到了长足的进步，两弹一星、载人飞船、生物工程、信息技术等正在大步追赶国际先进水平。科学技术转化成的强大生产力，对国民经济发展和社会进步，对增强综合国力产生了重大的影响。

改革开放以来，在中国共产党的“科教兴国”方针的鼓舞下，举国上下，尊重科技，学习科技，普及科技，创新科技，应用科技，发展科技，已蔚然成风。科技结硕果、神州尽彩虹的绚丽画面，正在展示于世人面前。自 16 世纪中叶中国科学技术失去世界领先地位后所形成的中西科学技术的差距，现在正在缩小。重振中华科学技术雄风的序幕已经拉开。

为了能使我国的科学技术水平在不久的将来赶上并达到世界先进水平，我们不仅要自己进行科学技术创新，也要学习世界上一切国家的先进科学技术；不仅要靠国内的科技工作者发展我国的科学技术，还要借助海外学者特别是华人学者的力量。在这种思想的指导下，我们萌生了组织海外学者编写科技前沿丛书的想法。这一想法在海内外学者中引起了强烈的反响。在他们中，有的出谋献策，有的出资开会，有的撰稿，有的审稿，有的愿把稿酬作为基金，……海内外学者的诚言乐行，极大地感染着我们，鼓舞着我们。这一想法得到了教育部陈至立部长和周远清副部长的肯定和支持，这增加了我们开展此项工作的决心和信心。根据各方面的意见，经过反复研究，最后将丛书定名为《当代科学前沿论丛》。《论丛》是我们献给祖国母亲的 21 世纪的圣礼，企盼我国能在 21 世纪夺回三四百年前失去的科学技术领先的地位。《论丛》如能在推动我国科学技术进步和“科教兴国”中有所作用，将是我们的最大欣慰。为了做好本《论



丛》的出版工作，我们邀请了国内一些著名科学家和在海外工作的部分优秀学者组成《论丛》的专家委员会，帮助筹划、组织和评议《论丛》的出版。随着学科的发展，专家委员会的成员可能会有所变化。我们向一切关心和支持《论丛》出版工作的人士，表示衷心的感谢。由于缺乏经验，《论丛》出版后，编辑出版方面的不足，在所难免，诚望各方指正。

高等教育出版社

2000年6月

《地球科学进展与评论》序

《地球科学进展与评论》(Advances in Earth Sciences)是中国地球科学促进会*在国内出版的第一个中文系列丛书。该学会于1999年成立,其成员为在国外地学界任教和从事研究工作的华人学者。学会的宗旨是交流国际上地球科学发展的最新进展和成果,协助中国地学界与国外的合作和促进中国地学的发展。我们希望通过国内外华人学者的努力,进一步振兴中国地球科学事业,使中国能尽快成为世界地学强国。学会的活动包括在国内举办地球科学年度讲座,出版中文书籍介绍世界地学界的新领域和新进展,与国内学者共同举办公学术会议,与国内学者进行科研合作,协助在国内创办世界一流的地学研究所,协助并参与国内地学研究的运作,如帮助国内杂志审稿和编辑以及科技咨询等等。

《地球科学进展与评论》的目的是向国内读者介绍世界地球科学发展的前沿。我们希望本丛书能帮助众多读者了解国际地学界研究动态,很快进入新的研究领域并找到新的研究课题。为了适应更多的读者,每个课题的介绍尽量深入浅出,起点都比较低,基本原理的解释比较详细,但终点都达到该课题的最新成就并包括作者对未来的展望。每篇文章都附有大量参考文献,以便读者追根溯源。

我们计划以后每年配合本促进会的年度讲座出版一卷《地球科学进展与评论》,作者将包括国内外地学界的专家。我们希望通过几年的努力,《地球科学进展与评论》能与《Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences》、《Earth-Science Reviews》和《Reviews of Geophysics》并驾齐驱。

* 英文名称为: International Professionals for the Advancement of Chinese Earth Sciences; 简称为: IPACES;
网址为: <http://www.ipaces.org>

前 言

2000年6月,来自于美国和日本的8位中国地球科学促进会的学者在南京大学举行了地球科学讲座,题为“地球的结构、演化和动力学”。这是中国地球科学促进会在国内举行的第一次讲座。我们深切感谢南京大学的王良书教授具体组织了这次讲座,同时感谢他帮助我们找到翻译。讲座后,我们组织编写了《地球的结构、演化和动力学》一书。该书大部分章节源于讲座。

本书分为8章,每一章都基本独立,自成体系。全书评述了地球的结构、演化和动力学的一些课题和进展,但并无意涵盖全部领域。第一章介绍地震波成像的原理及其在研究地球内部结构和勘探中的应用。第二章是第一章的姊妹篇,介绍用地震波成像研究俯冲带。第三章介绍地球深部地幔内的相变和矿物学,及其与地震波界面的对应。第四章介绍地球最深部的地核的结构、组成和性质。从第五章开始引入地质演化和动力学。第五章介绍地质年代学的原理和地球的年龄。第六章介绍造山带的动力学尤其是重力滑塌,并应用于喜马拉雅-青藏高原和安底斯造山带。第七章介绍喜马拉雅-西藏造山带的地质演化。第八章介绍洋中脊的动力学。

我们在此向下列审稿者表示深切感谢:陈晓非(北京大学),陈运泰(国家地震局),高弘(台湾中央研究院),高锐(中国地质科学院地质所),嵇绍成(École Polytechnique Montréal, Canada), J. Martignole(École Polytechnique Montréal, Canada), K. McKeegan(UCLA, USA), P. Tackely(UCLA, USA),汪品先(同济大学),王克林(Geological Survey of Canada), L. Warr(U. Michigan, USA),邹海波(UCLA, USA)和几位匿名审稿者。同时,我们也感谢高等教育出版社的编辑为本书出版所作的许多努力。

张有学 University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA

尹安 University of California, Los Angeles, CA, USA

2001年9月

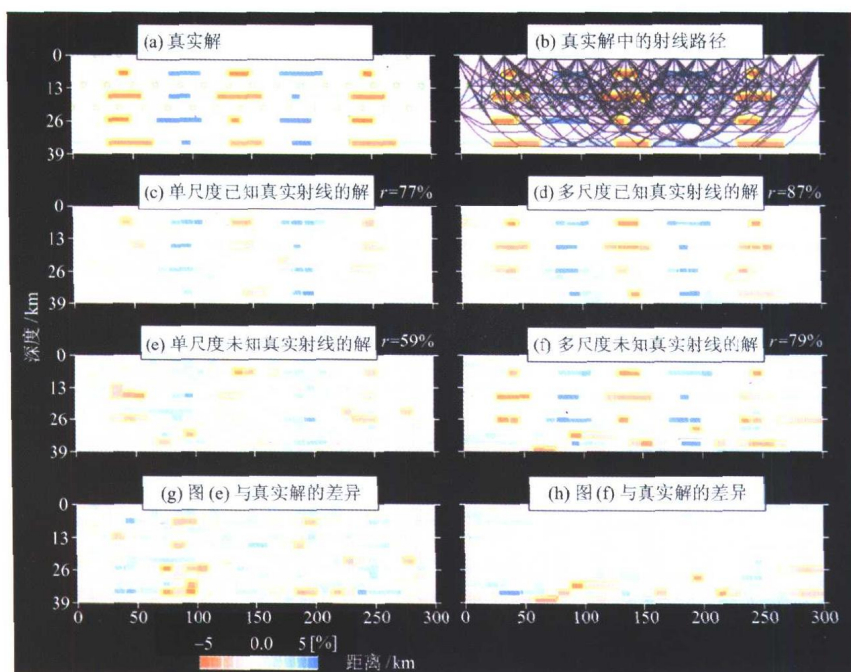


图 1-3 2D 合成模型中折射射线 SST 和 MST 对比的控制研究
按层平均值的百分比绘出速度扰动。

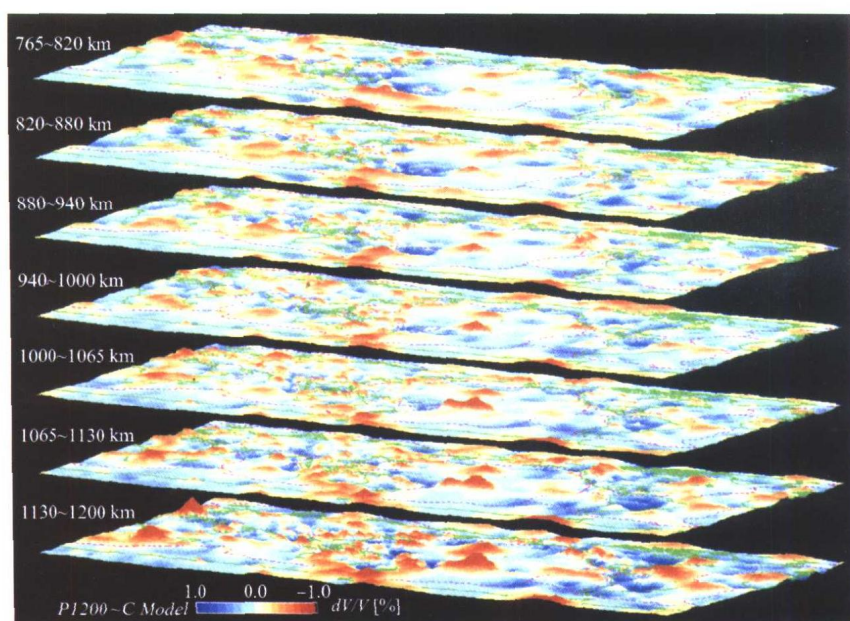


图 1-5 P1200 纵波模型在中地幔的三维透视图
颜色和假高程表示横向速度异常。高程的高与低表示慢异常和快异常。

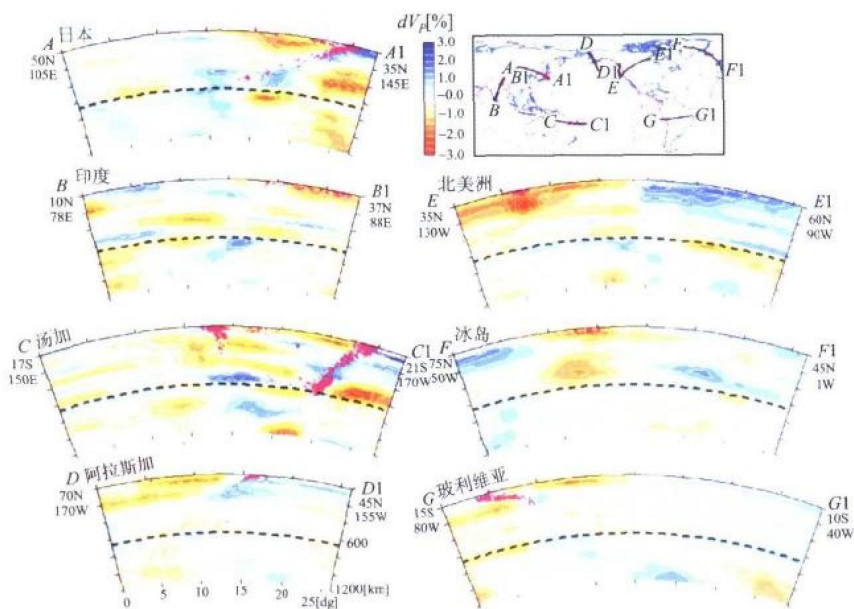


图 1-6 P1200 纵波模型在插图内位置的几个剖面
冷色和暖色分别表示高速和低速横向速度异常，紫色点为震中，虚线是 670km 间断面。

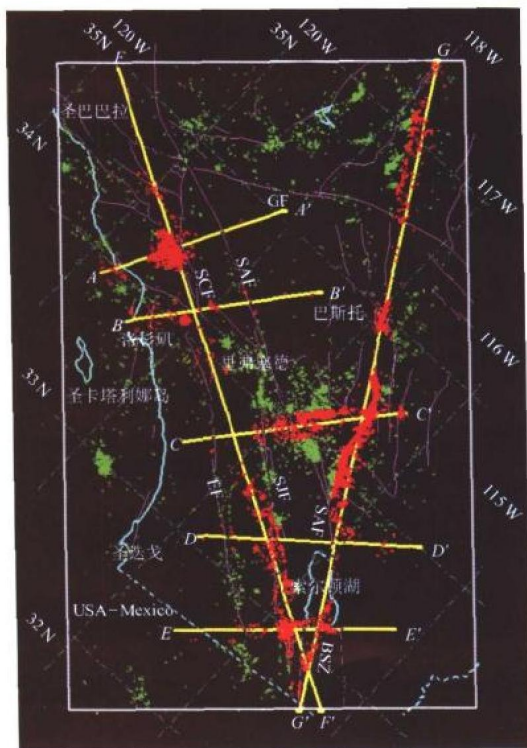


图 1-7 南加州研究地区位置图

黄线是图 1-9 和图 1-10 中波速剖面的位置。红点和绿点表示 37 000 多个震源，离 7 条剖面中任何一条 10km 之内的用红点，超过 10km 的用绿点。紫色线条表示本地区的大断裂系统。缩写字母表示：圣安德列斯断层 (SAF), Garlock 断层 (GF), Sierra Nevada 断层 (SNF), San Gabriel 断层 (SGF), Sierra Madre 断层 (SMF), Elsinore 断层 (EF), San Jacinto 断层 (SJF), Banning 断层 (BF), Mission Creek 断层 (MCF), Imperial 断层 (IF), Brawley 地震带 (BSZ), 和 1992 年发生的 Landers 地震带 (LSZ)。

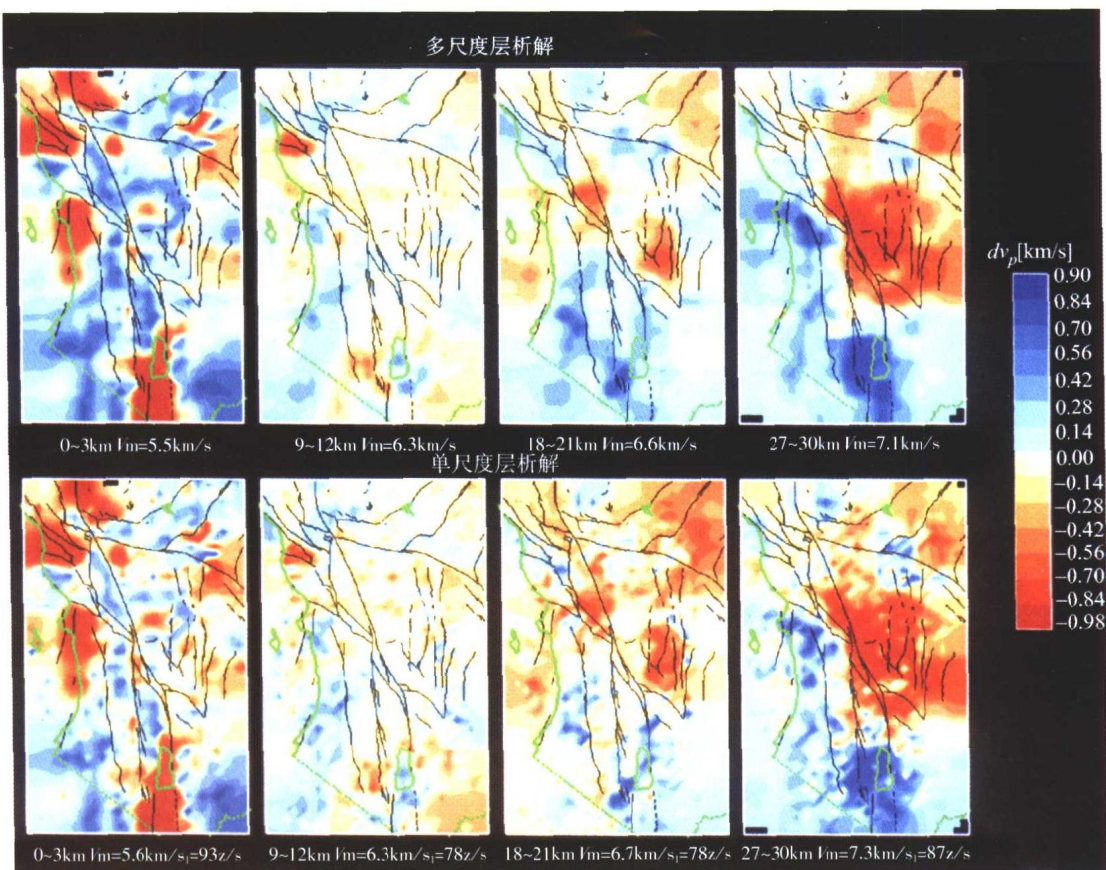


图 1-8 多尺度层析解(上图)与单尺度层析解(下图)在 4 个不同深度上的对比

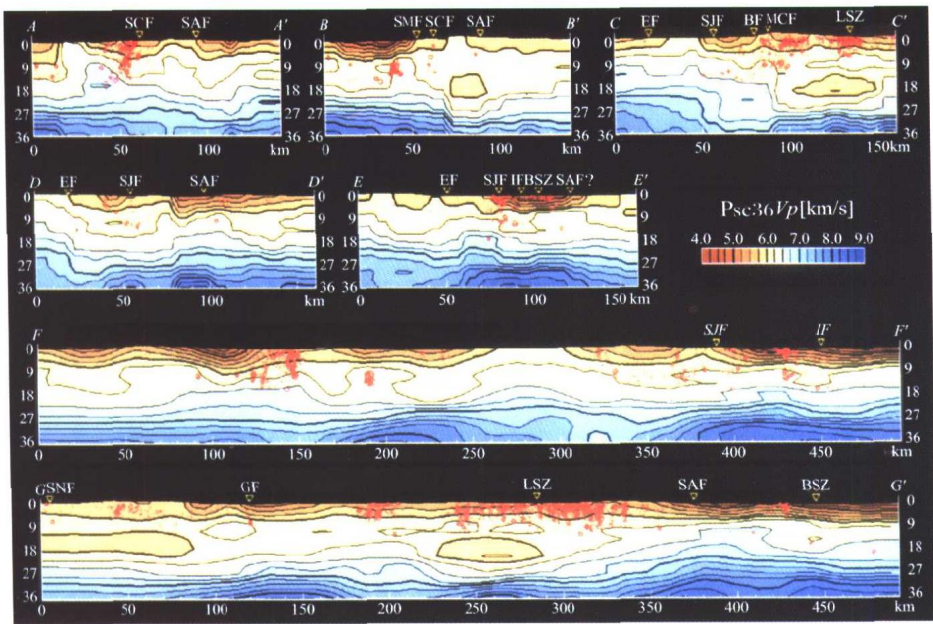


图 1-9 南加州纵波波速模型的 7 条剖面

黄三角表示剖面与图 1-7 中标明的断层或地震带的交点。在每条剖面 10km

以内的地震(见图 1-7)用小十字($2\frac{1}{4} < M_c < 3\frac{1}{2}$)和小圆圈($M_c \geq 3\frac{1}{2}$)表示。

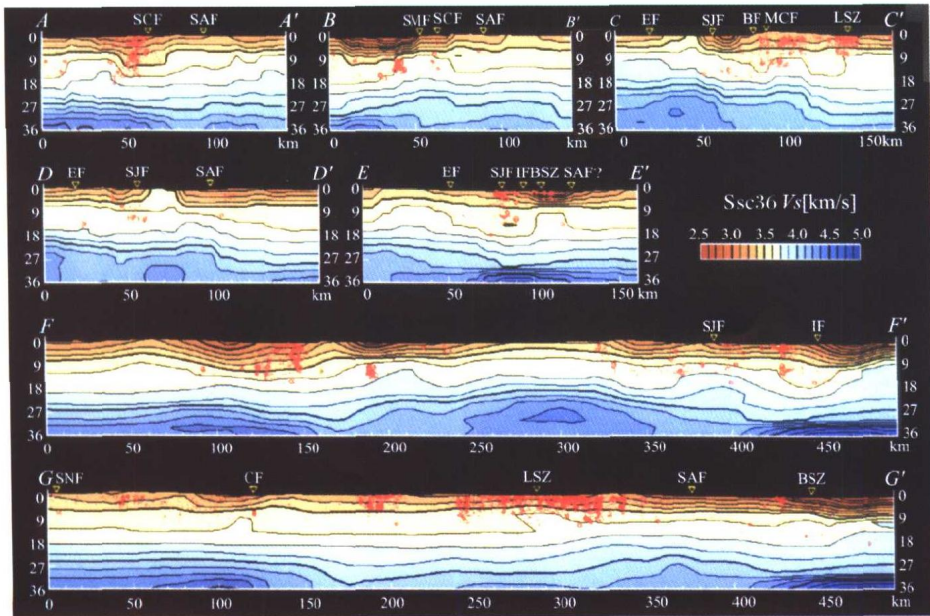


图 1-10 南加州横波波速模型的 7 条剖面 (参见图 1-9 说明)

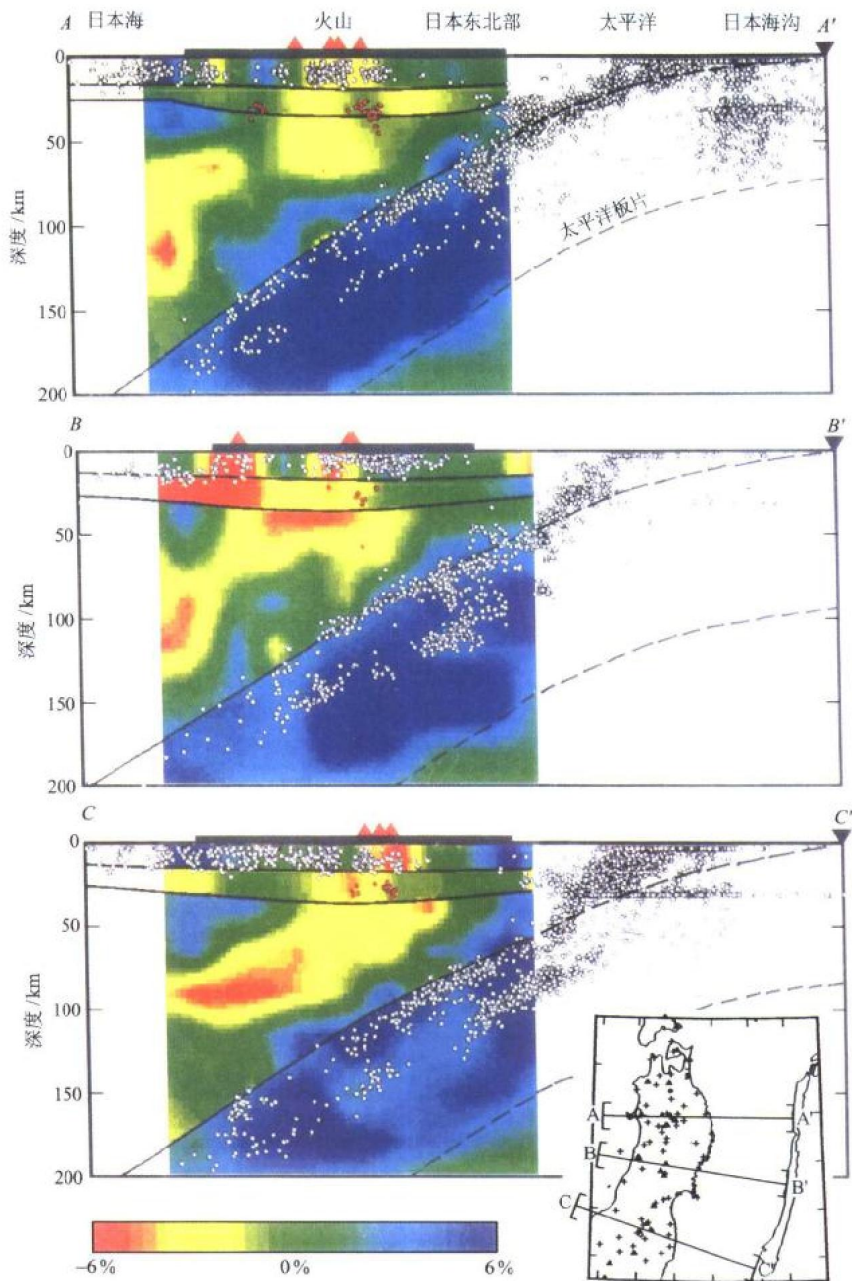


图 2-2 日本东北部沿插图内 3 条剖面的 P 波速度结构的断面图

红色和蓝色分别表示低速和高速,底部给出了速度扰动尺度。白色圆圈表示每条剖面的 40km 宽度范围内发生的微小地震。红色圆圈表示莫霍间断面附近由于岩浆和火山活动而发生的低频微小地震。红色三角形——活火山;倒三角形——日本海沟的位置;断面顶部粗的水平线表示设置地震台站的陆地区。三条实曲线分别表示地壳的康拉德间断面、莫霍间断面和俯冲的太平洋板片的上部边界,虚线表示板片的下部边界。浅层地震发生在上地壳,中等深度地震和深源地震发生在俯冲的板片内。

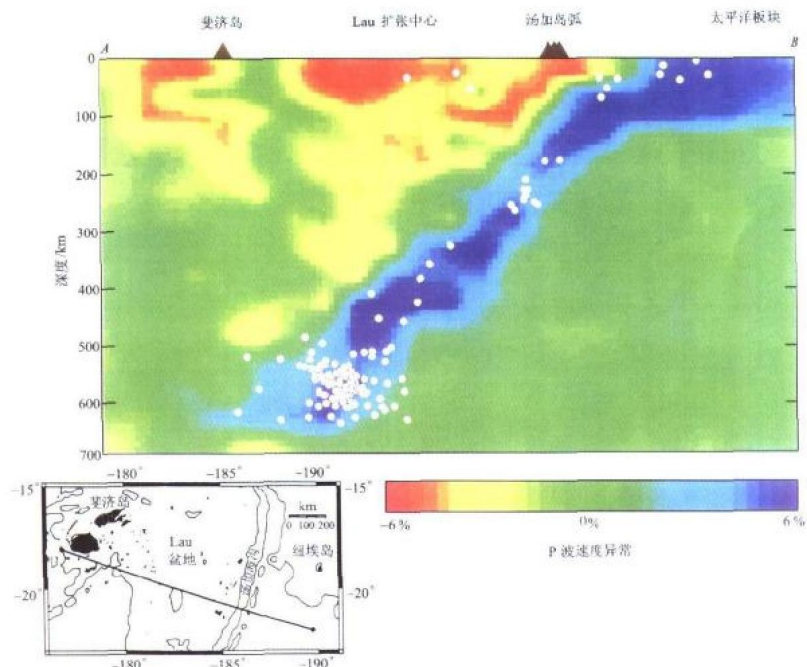


图 2-4 汤加岛弧和 Lau 弧后下沿插图 AB 线的 0~700km 深度的 P 波速度断面图

红色和蓝色分别表示低速和高速。实三角形——活火山；断面 40km 宽度范围内的地震用白色圆圈表示，底部给出了速度扰动比例。

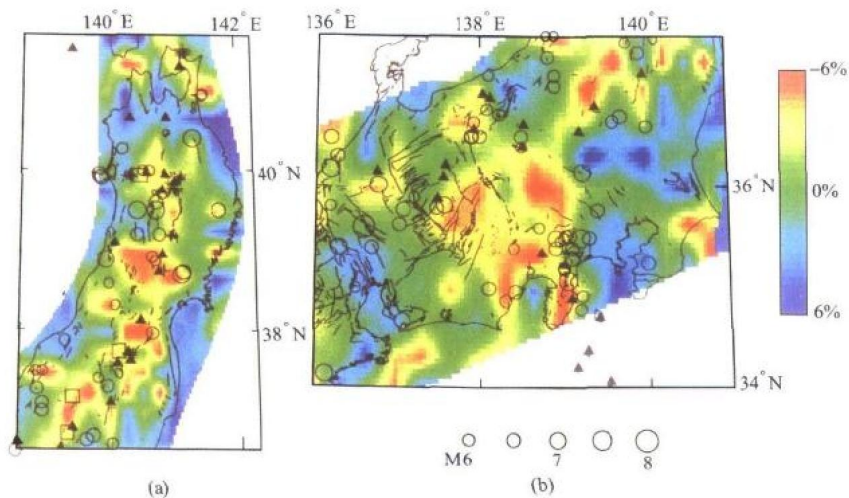


图 2-5 日本东北部(a)和中部(b)的 40km 深度的 P 波速度成像

红色和蓝色分别表示低速和高速，圆圈表示从 1885 年到 1999 年 115 年间发生的震级 5.7~8.0，深度 0~20km 的地震。实三角形——活火山；实线表示活断层。图的右边和底部显示速度扰动尺度和震级尺度。十字形和空方形分别表示中地壳内的低频微震和 S 波反射体。

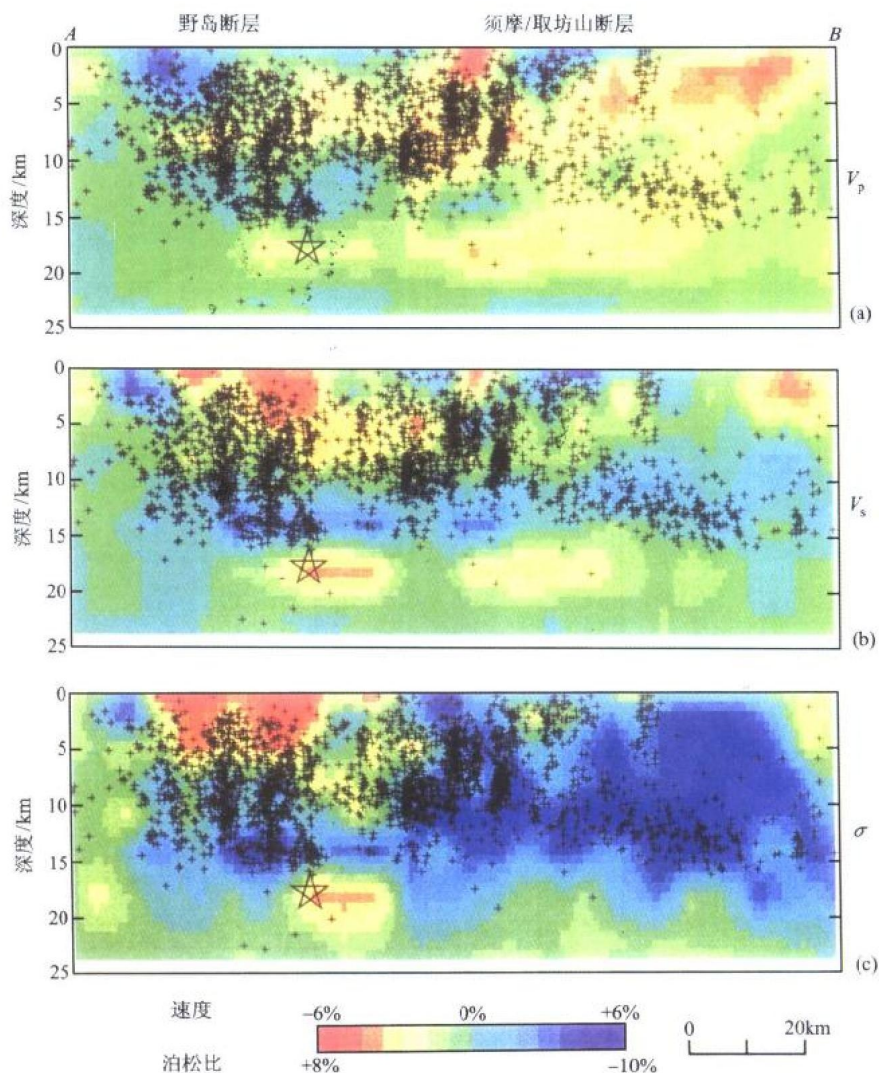


图 2-7 神户地震区的 P 波(V_p)、S 波(V_s)和泊松比(σ)的断面图

红色表示低速和高泊松比,蓝色表示高速和低泊松比。 V_p 和 V_s 的速度扰动范围相对一维速度模型而言为-6%~6%,泊松比为0.225~0.27(相对平均值而言-10%~8%)。小十字形表示神户断层带6km宽度范围内的余震,星号表示神户地震主震的震源。震源深度为17km,垂向放大比例为2:1。