

探索地球内部结构和地震震源机制——地震学家Adam M. Dziewonski教授的学术成就简介

刘沁雅, 谷宇 and 姚华建

Citation: [中国科学: 地球科学](#) **47**, 509 (2017); doi: 10.1360/N072016-00354

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072016-00354>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSTe/47/5>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[《20世纪中国知名科学家学术成就概览》简介](#)
科学通报 **59**, 2762 (2014);

[上地壳低频地震波频散现象的物理学机制被揭示](#)
科学通报 **55**, 3350 (2010);

[卫星热红外异常与强震关系研究实例](#)
科学通报 **39**, 2074 (1994);

[中国大陆地震震源深度及其构造含义](#)
科学通报 **47**, 663 (2002);

[2008年汶川大地震的时空破裂过程](#)
中国科学D辑: 地球科学 **38**, 1186 (2008);



探索地球内部结构和地震震源机制——地震学家 Adam M. Dziewonski 教授的学术成就简介

刘沁雅^{1*}, 谷宇², 姚华建³

1. University of Toronto, Toronto M5S 1A7, Canada;

2. University of Alberta, Edmonton T6G 2G7, Canada;

3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

* E-mail: liuqy@physics.utoronto.ca

收稿日期: 2017-01-10; 接受日期: 2017-02-14; 网络版发表日期: 2017-03-30

摘要 Adam M. Dziewonski (1936~2016) 生前是哈佛大学地球与行星科学系教授, 世界著名地球物理学家与地震学家。鉴于Dziewonski教授在固体地球物理领域的重要基础贡献, 1998年瑞典皇家科学院授予他Crafoord奖(被誉为地学界的“诺贝尔奖”), 1999年美国地震学会授予他Harry Fielding Reid奖章, 2002年美国地球物理学会授予他William Bowie奖章。Dziewonski教授的研究注重于利用地震观测资料来探索地球内部结构和地震震源机制, 他最杰出的工作包括: (1) 发展了地震矩中心位置和震源机制(CMT)反演方法, 建立了实时自动反演全球中大型地震震源参数的系统, 以及具有搜索功能的震源参数数据库以及相关的网站; (2) 发展了被地学界广泛应用的一维地球参考结构模型 PREM; (3) 将层析成像方法应用于地球深部结构的研究中, 反演获得三维非均匀地幔的速度结构模型, 以及地球内部结构间断面的深度起伏特征; (4) 证实地球内核的固态性, 发现地球内核的各向异性和内核最深部的结构特征。Dziewonski教授是很多地震学领域的开创者, 他在地震学基础研究领域的重大贡献深刻而广泛地影响着全世界的地震学家以及其他地球科学领域的研究者。本文简要介绍了Dziewonski教授主要的科研工作、核心的学术成就及重要的学术服务贡献, 并探讨了他学术研究成功的因素, 希望能够对从事地球科学研究的学者有积极的启示。

关键词 Dziewonski教授, Crafoord奖, 地震震源, 地球内部结构

1 教育和工作经历简介

Adam M. Dziewonski教授1936年11月15日生于Lwow(现隶属乌克兰, 当时还属于波兰)(Romanowicz, 2016a)。他于1960年获得波兰华沙大学(University of Warsaw)的硕士学位, 1965年获得波兰矿业和冶金大学

(Academy of Mines and Metallurgy at Krakow, Poland)的博士学位, 并曾短暂地成为波兰科学院地球物理学院的研究人员。之后在美国德州西南高等研究中心(Southwest Centre for Advanced Studies at Dallas, Texas)的帮助下, 克服了冷战中美国政府对华沙条约国科学家赴美开展科学研究工作制造的签证阻碍, 成为该研

中文引用格式: 刘沁雅, 谷宇, 姚华建. 2017. 探索地球内部结构和地震震源机制——地震学家Adam M. Dziewonski教授的学术成就简介. 中国科学: 地球科学, 47: 509-517, doi: [10.1360/N072016-00354](https://doi.org/10.1360/N072016-00354)
英文引用格式: Liu Q, Gu Y J, Yao H J. 2017. Exploring structures of Earth's interior and earthquake source mechanisms—Scientific contributions by seismologist Adam M. Dziewonski (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 47: 509-517, doi: [10.1360/N072016-00354](https://doi.org/10.1360/N072016-00354)

究中心的研究人员. 1969年他被聘为美国德州大学达拉斯分校的助理教授, 1972年开始相继担任哈佛大学地质科学系(后更名为地球与行星科学系)的副教授、教授、系主任(1982~1986)及Frank B. Baird, Jr 教授, 直至2009年退休. 2016年3月1日, 他因病在位于美国马萨诸塞州剑桥镇(Cambridge)附近的医院离世, 享年79岁.

因为他对认识地球内部结构及地震震源机制所作出的根本性贡献, Dziewonski教授成为了地球科学领域三重桂冠的获得者, 包括于1998年获得瑞典皇家科学院(Royal Swedish Academy of Sciences)的Crafoord奖¹⁾, 1999年获得美国地震学会颁布的Harry Fielding Reid 奖章, 2002年获得代表美国地球物理学会最高荣誉的William Bowie奖章. 此外, 他还获得其他众多荣誉, 包括1982年当选为美国地球物理学会会士(American Geophysical Union Fellow), 1988年成为美国人文和科学院院士(American Academy of Arts and Sciences Fellow), 1994年成为古根海姆研究员(Guggenheim Fellow), 1995年当选为美国国家科学院院士(National Academy of Sciences member), 1996年成为美国科学促进会会士(American Association for the Advancement of Science, Fellow)(Romanowicz, 2016b).

2 主要学术成就

2.1 背景

虽然人类对地震这种自然现象以及其巨大破坏性的认识有着很长的历史, 但是地震学直到十九世纪末二十世纪初才从一门描述性的学科转变成成为定量的科学. 随着观测仪器的进步和大量观测资料的积累, 人们对地震波传播、地球内部介质结构以及全球地震带分布的了解有了长足的进步. 尤其是在1960年后, 地震学作为监测地下核爆的主要手段之一更加得到重视. 1961年全球标准地震台网(WWSSN)的建立为地震学家提供了大量高质量的模拟记录地震数据, 成立于1964年的国际地震中心(ISC)也开始提供全球地震震相的走时数据和地震定位的信息, 这些大量的数

据给地震学家带来了前所未有的机遇和挑战. 与此同时, 随着计算机在科学研究中的应用, 计算能力的提高以及新的数字信号处理和频谱分析方法的发展, 很多之前无法实现的分析和计算成为可能. 这使得地震学家们能够更加充分地利用这些地震资料, 发展新的理论和技术, 从而推动了我们对于地球内部精细结构、地震定位和震源机制的认识, 同时也为地球板块构造理论的建立和发展提供了关键的证据(Agnew, 2002).

20世纪50~60年代很多学者开始把研究注意力集中在地震图中振幅最大周期较长的表面波上. 地震学家们做了大量关于地震面波速度测量的研究, 并掌握了计算面波的理论频散曲线的方法. 1960年南美洲智利发生了9.3级大地震, 地球的自由振荡被首次观测到, 证实了之前科学家提出的自由振荡理论. 智利地震以及1964年美国阿拉斯加9.0级地震提供的前所未有的高质量数据, 使得越来越多的简振型(normal modes)被发现, 而地球自由振荡的观测也成为了新的地震学观测手段. 同时地球自由振荡理论得到了快速发展, 振荡周期和地球内部结构的关联为了解地球内部的精细结构和地球物理反演方法的发展铺平了道路, 同时也促进了数字地震仪的诞生(Agnew, 2002).

2.2 面波频散测量、地球的自由振荡和一维地球结构模型

从在美国德州西南高等研究中心工作时起, Dziewonski教授就对面波的频散测量有着极大的兴趣. 区别于前人常用的对地震面波的波峰和波谷进行测量来获得群速度的方法, 他与合作者在20世纪60年代末基于之前发展的“移动窗分析”(moving window analysis)方法, 提出了一种多频段滤波的方法用于测量单台群速度的频散曲线(又称为多重滤波法, multiple-filter technique), 至今仍是最常用的群速度测量方法之一. 他们也建议可以通过时频分析, 用双台法来测量台站之间的频散曲线. 他对大量经过不同区域(如地盾、海洋和板块活动区域)的面波进行了群速度和相速度频散曲线的测量, 揭示了面波群速度频散曲线对研究地球地壳和上地幔结构的重要性. 1972年他和合作者又提出残余频散(residual dispersion)的测

1) Crafoord奖每年从天文、数学、地学和生物学等领域选出全球贡献最杰出的科学家, 常被认为是地学界的诺贝尔奖. 甚至因为它是从多领域产生的, 有时也被认为比诺贝尔奖更难获得.

量方法,通过对观测面波和理论面波地震图的互相关来提高频散曲线测量的精度,同时有效的去除高阶面波(overtone)的影响.

随着著名地球物理学家加州大学圣地亚哥分校 Scripps 海洋研究所的 George E. Backus 和 Freeman Gilbert 在 20 世纪 60 年代中期对反演理论的建立和深入研究,70 年代初, Dziewonski 教授也开始投入到利用面波和自由振荡数据对地球内部结构的反演研究中.在对地球自由振荡本征频率反演地幔结构的不唯一性的研究中,他展示了密度和 S 波速反演结果可能存在的强相关性.之后他与 Freeman Gilbert 教授合作,花费两年时间数字化了 1964 年阿拉斯加地震的观测数据,并利用一种叠加和剥离(stacking and stripping)的方法准确识别了大量长周期地震记录频谱中地球自由振荡的本征频率,并利用这些本征频率和体波到时联合反演获得了地球内部一维结构,如当时有名的 1066A/B 模型 (Gilbert 和 Dziewonski, 1975).

在对地球自由振荡的理论研究和地球结构的反演中,他和合作者逐渐意识到衰减对自由振荡频谱的重要影响.他们通过对大量自由振荡的衰减的测量获得了地球的一维衰减模型,同时也解决了由自由振荡

数据反演的一维结构预测体波到时与观测到时之间存在的系统性偏差(baseline)问题.

基于 Dziewonski 教授之前用大量地震数据反演地球一维结构模型的丰富经验和成果,以及各固体地球物理学科对建立一个地球结构参考模型的期望,国际地震和地球内部物理联合会(International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, IASPEI)的“标准模型委员会”于 1977 年委托 Dziewonski 教授和加州理工学院的 Don Anderson 教授 (1933~2014) 来共同发展一个一维的地震学参考地球模型.他们利用了约 1000 个地球自由振荡本征频率、100 个自由振荡的衰减数据、500 个综合体波走时以及大约 175 万个 ISC 记录到的 P 和 S 波的走时信息,联合反演了地球的一维速度、密度以及衰减的结构模型,也就是被广泛使用的 Preliminary Reference Earth Model (Dziewonski 和 Anderson, 1981), 简称为 PREM. 在莫霍面和 220 km 深度之间,他们引入了径向各向异性,以满足基阶 Love 面波和 Rayleigh 面波观测到上地幔结构的不一致性(参见图 1). 这个模型对于远距离体波走时预测具有极高的准确度. 35 年以来, PREM 模型经受住了时间的考验,仍然是地震学(如三维层析成像)、矿物物理学等领域最

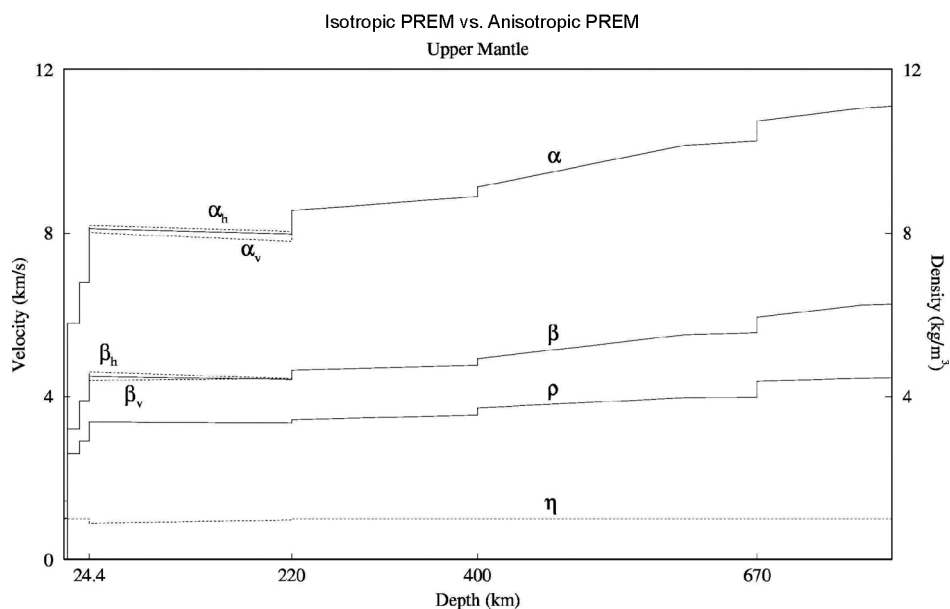


图 1 各向同性及各向异性 PREM 模型参数对比

图中实线表示各向同性(isotropic)PREM模型的地壳及中上地幔部分的纵波速度(α)、横波速度(β)和密度(ρ);虚线表示径向各向异性(radially anisotropic)PREM模型在莫霍面和220km深度之间的沿着水平(α_h)和垂直(α_v)方向传播的纵波速度,沿着水平方向传播的水平(β_h)和垂直(β_v)方向偏振的横波波速,以及径向各向异性参数(η). 据 Dahlen 和 Tromp (1998)

重要的一维参考模型, 至今被引用近7300次.

2.3 全球地震震源机制的反演

在利用地球自由振荡数据对地球内部介质结构反演的同时, Dziewonski教授与Gilbert教授也提出可以用多个台站的自由振荡频谱的振幅来反演地震的矩张量和频谱. 他们首次把矩张量反演方法用到了深源地震研究中, 指出深源地震的发生伴随着地球内部体积的变化, 很可能与矿物的相变有关.

1981年, Dziewonski教授与刚刚来到哈佛大学的John Woodhouse教授合作, 提出可以用地震波的体波(>45s)以及地幔面波(>135s)波形数据来反演“最佳”点源地震参数, 包括地震矩张量(moment tensor)、矩中心(centroid)、发震时间和位置 (Dziewonski等, 1981). 他们之后利用这个迅速而有效的方法自动的对全球5级以上的地震进行系统性的震源机制反演. 2004年以后, 中长周期(35~100s)的表面波被引入到反演中, 从而大大的提高了中小型及浅层地震震源参数反演的精度(Ekstrom等, 2002). 从1981年开始, 他们定期发布每个季度的中大型地震震源的“中心矩张量”(Centroid Moment Tensor, 又称为CMT)模型, 并在1982年建立了“哈佛大学中心矩张量计划”(Harvard CMT Project), 2006年更名为“全球中心矩张量计划”(Global CMT Project), 并开始由他以前的学生, 现哥伦比亚大学地震学教授Goran Ekstrom管理(参见图2). 为方便地球科

学研究者的使用, 他们还建立了地震CMT参数的数据库, 可在广为使用的<http://www.globalcmt.org>网站上搜索和下载相关CMT参数. 这个极具价值的数据库为地震分布和构造研究提供了可靠和完整的震源参数信息, 可以用于描述地震活动区的断层形态、应力场的空间分布及变化特征, 成为研究不同构造活动区运动和形变的最基础的工具之一.

2.4 全三维地幔速度结构

在对地球自由振荡的理论研究和地球结构的反演中, Dziewonski教授和他的合作者们开始把注意力从简单的非自转一维弹性地球结构(SNREI)转移到非球形结构, 如由地球椭率(ellipticity)和自转造成的自由振荡模式分裂(mode splitting). 1977年他利用体波(P波)的到时数据首次反演了地幔的三维结构(Dziewonski et al., 1977), 虽然只展开到3阶球谐函数(degree-3 spherical harmonics), 但是所得下地幔二阶和三阶球谐函数的非均匀结构, 直到今天仍然有重要参考价值. 同时他们通过统计的方法发现了地球表面重力异常与地幔中结构非均匀性的相关性, 并试图结合矿物物理及地球动力学来解释这些异常的可能成因. 1984年他使用更多P波到时数据, 在同时考虑了震源参数的反演和与地壳结构相关的台站矫正(station correction)的情况下, 反演出更高分辨率(6阶球谐函数)的下地幔速度结构, 并发现了环太平洋高速异常带. 同年他与Woodhouse

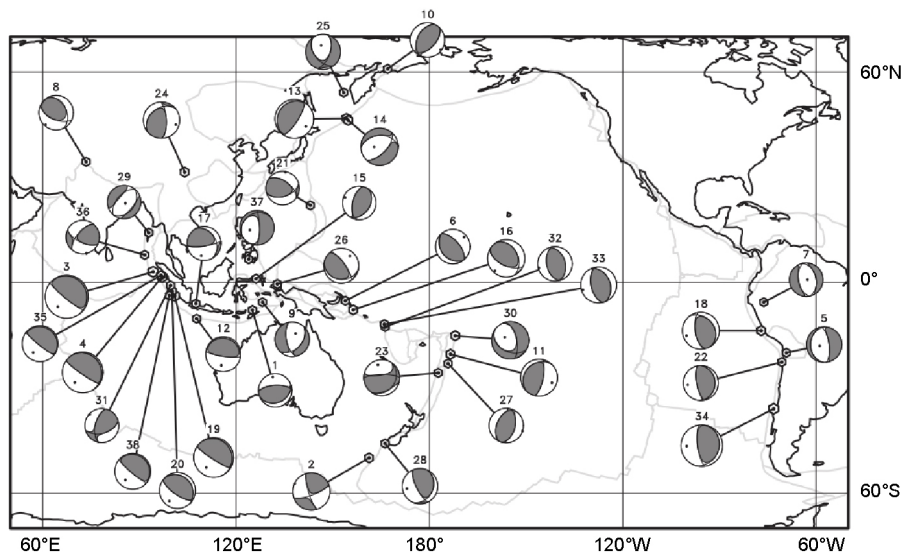


图2 Global CMT反演的2004~2010年全球最大的38个地震($M_w > 7.5$)的中心矩张量和位置
据Dziewonski教授生前发表的关于中心矩张量的最后一篇文章(Ekstrom等, 2002)

教授合作,通过对地幔面波(mantle waves)的反演得到了上地幔S波速的8阶球谐函数模型,显示了构造活动区(如洋中脊)上地幔对应较低剪切波速度,而地盾和克拉通等地区则对应较快的速度(Woodhouse和Dziewonski, 1984). 这两篇论文成为全球地幔三维结构反演的代表作,为地球科学的发展开拓了一个全新的领域.

1987年, Dziewonski教授再次与Woodhouse教授合作,在*Science*杂志上发表了从地表到地核的三维速度结构模型(参见图3). 这篇文章不但再次证明了1986年Andrea Morelli等人提出的内核各向异性的理论(见章节2.5),还对地幔的三维结构成像、速度结构的显示以及推广作出了影响深远的贡献. 1994年, Dziewonski教授和他的学生苏维加及博士后Bob Woodward反演得到了全球地幔12阶球谐函数的剪切波速度模型(Su等, 1994). 这篇文章引进了当时还没有普及的“检测板”分辨率测试方法(checkerboard test),并对地幔在不同深度的不均匀度进行了定量分析,得到地学界的一致好评,至今引用次数超过700次.

Dziewonski教授治学严谨,非常注重反演结果的数据兼容性. 他的一句口头禅是“模型也许是多样的,但是地球只有一个”. 为了得到更全面的反演结果,

Dziewonski教授和他的合作者们不仅仅采用各类地震资料(比如面波、体波和自由振荡),还先后在反演过程中引进了大地水准面/重力(1994)、体积声速(1997)、径向各向异性(1998, 2005, 2007, 2008)以及地幔内部断面深度(1998, 2003)(参见图4). 其中,他与Ekstrom 1998年在*Nature*杂志上发表的文章为北太平洋地幔对流的特性和海山的形成做出了合理的解释. 在之后的十几年里, Dziewonski教授的研究对进一步理解全球结构反演模型的稳定性和参数选择的影响作出了切实的贡献. 像地震中心矩参数一样,哈佛大学的全球地幔结构模型也一直在地球科学界被广泛引用. 直到去世前一个月,这位公认的“全球内部结构之父”还在为建立一个三维地球参考模型不懈努力(Romanowicz, 2016b).

2.5 地核的结构

1912年德国地球物理学家Beno Gutenberg发现了核幔边界(固态地幔与液态外核的分界面,又称古登堡界面), 1936年丹麦女地震学家Inge Lehmann提出了固体内核的存在. 1971年, Dziewonski教授与加州大学圣地亚哥分校的Freeman Gilbert教授合作,通过对地球自由振荡数据的反演首次证实了Lehmann提出的固体

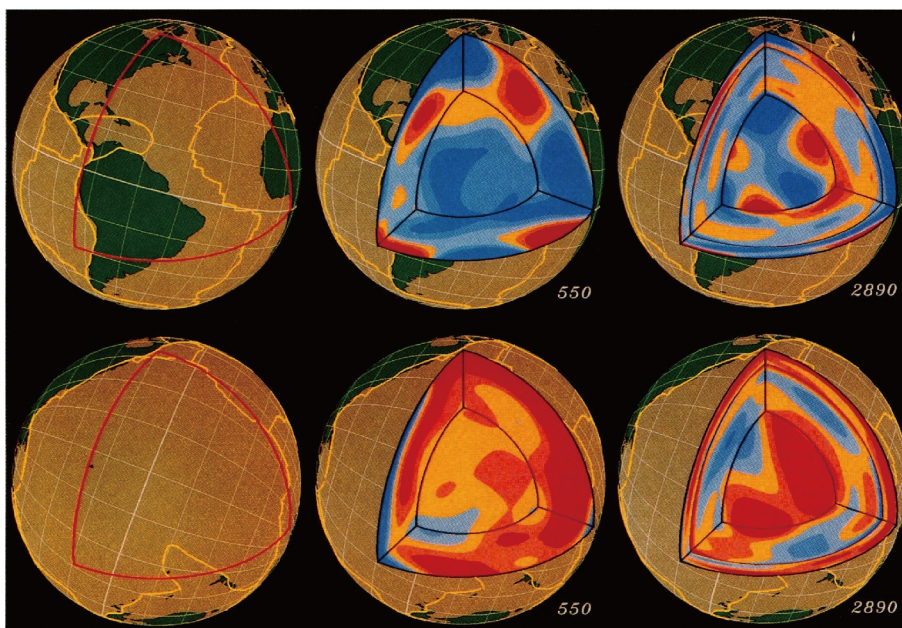


图3 从大西洋(上排)和太平洋(下排)视角看到的地球内部三维模型在550km(中间列)和2890km(最右列)深度处的速度异常分布截面图

据Dziewonski和Woodhouse (1987), 红色代表低速异常, 蓝色代表高速异常

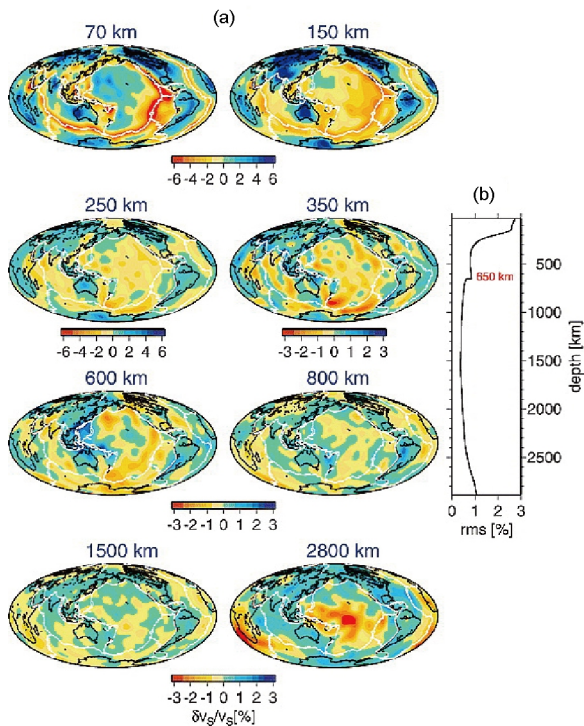


图4 地幔模型S362ANI在不同深度的各向同性横波速度扰动截面图(a)以及对对应扰动大小的幅度随深度的变化(b) 据 Kustowski等(2008)

内核的存在, 并给出了内核的横波速度大约在3.5km/s (Dziewonski和Gilbert, 1971). 之后他们发现了一些只在固态内核情况下存在的内核自由振荡模式(inner core mode), 再次印证了内核固态性质。

1986年, Dziewonski教授与他当时的博士后 Andrea Morelli及Woodhouse教授合作发表论文(Morelli等, 1986), 通过对穿透内核的PKIKP震相走时数据分布异常的分析, 提出地球的内核存在各向异性, 其快轴的方向为地球的自转轴, P波在沿自转轴方向传播的速度要比沿赤道平面的传播速度越快1%。1987年, Dziewonski教授与Andrea Morelli通过对在核幔边界反射的P波以及穿过内核的P波走时数据的反演获得核幔边界的起伏形态(Morelli和Dziewonski, 1987). 他们的结果显示核幔边界的起伏非常小(± 6 km以内), 这说明液态外核的横向变化几乎是很难被探测到的, 与静水压(hydrostatic)理论偏差很小。之后, Dziewonski教授与他的学生苏维加使用30多万PKIKP走时数据进一步反演获得4层内核的各向异性参数, 并发现地球内核最里面200~300km的各向异性强度最大($>3\%$)。2002年,

Dziewonski教授和他当时的另一位学生Miaki Ishii发表论文认为地球内核存在一个最内核(innermost inner core), 半径大约300km, 且最内核各向异性慢轴的方向与东西方向呈 45° 夹角, 而其外部内核的慢轴方向为东西方向(Ishii和Dziewonski, 2002). 最内核各向异性的显著差异揭示内核形成经历过两个时期, 可能与地球内核环境的变化密切相关。

3 公共服务及其他贡献

Dziewonski教授在深入开展地震学研究的同时也为推动地球科学领域平台和资源的发展作出了杰出贡献。他不仅在利用地震波数据进行地震学研究上成绩斐然, 还在地震台站的建设和地震数据的记录及发布方面作出了重要贡献。他积极推动了数字地震仪在位于哈佛大学的地震台站 HRV的使用, 并经常亲自到台址去检查其维护状况。为纪念他的杰出贡献, 这个台站在他退休两年后(2011年)被命名为Adam Dziewonski台站。他积极推进了美国地震研究领域的数据共享。在20世纪80年代初期, 他协助发起创建了美国地震学联合研究会(Incorporated Research Institutions for Seismology, 简称为IRIS, <http://www.iris.edu>), 这是一个由100多个大学共同组成的联合会, 致力于收集、整理和分发地震数据, 以及促进地震学科的教育和科研发展。在IRIS, 他担任过一些核心的领导职位, 例如全球地震台网(Global Seismic Network, 简称为GSN)的执委会主席(1984~1987)、指导委员会主席(1996~1998)和计划委员会主席(2000~2003), 美国台震观测计划(USArray)顾问委员会主席(2004~2008)。对于过去地震的模拟记录, 他孜孜不倦地促成对它们的数字化, 使它们更容易被地震学家们所广泛使用。

他也对基于合作和共享地震数据原则的国际组织数字地震台网联合会(Federation of Digital Seismic Network, 简称FDSN)的建立起了关键的作用, 并于1986~1989年间担任该组织的副主席, 1989~1994年担任主席。他对国际海底地震观测台网(Ocean Seismic Network)的建设也起到重要的推动作用, 1989~1994年担任其委员会的联合主席。从1993年起, 他一直是致力于推进海底观测台网发展的国际海洋网络(International Ocean Network)的执行委员会成员。此外, 他还担任过国际地震中心(International Seismological

Centre)执行委员会主席(1994~1997)及管理委员会主席(1997~2005). 他同时也是深部地球研究联合会(Cooperative Institute for Deep Earth Research, 简称CIDER)的重要发起人之一,并在2002~2005年担任CIDER的指导委员会主席,该联合会一直致力于推动跨学科研究交流合作和对年轻地球科学家的训练. 另外, Dziewonski教授还担任过一些重要国际学术期刊的副主编和编委,例如*Geophysical Research Letters*, *Journal of Geodynamics*, *Physics of Earth and Planet Interior*等.

Dziewonski教授生前还致力于教育和指导年轻一代的地球科学家. Dziewonski教授很注重本科和研究生的教育. 他经常亲自开车带着本科生到Dziewonski地震台以及野外实习. 尽管他讲授的高年级地震学课程有时候只有3~5个他自己组内的研究生,但他几乎从来不会耽误课程. 由于经常出差,他会尽量把有限的时间利用起来帮助学生. 大部分的周末他会开45分钟的车到系里,沏上一杯速溶巧克力,然后在计算机房里与学生们在讨论研究问题中度过. 在阅读文献时,他会提醒学生不要盲目接受已有的结果,要多想想不足之处,同时要对自己有信心,相信自己会做得比前人更好. 他很尊重学生自己的风格和思想,只要研究结果核实了,具体细节(比如如何有效的绘图和表达)他会给学生充分的自由度和发挥空间. 在写文章或是做讲座时,尽管他的思想和指导经常是起决定作用的,通常他会把学生或者合作者的名字排在自己名字的前面,并让他们担任通讯作者.

与Dziewonski教授合作过的学生和博士后包括Joe Steim、Andrea Morelli、Goran Ekstrom、Bob Woodward、Alessandro Forte、Weijia Su (苏维加)、Xianfeng Liu (刘险峰)、Yu Jeffrey Gu(谷宇, 见图5)、Lapo Boschi、Miaki Ishii、Bogdan Kustowski、Meredith Nettles和Colleen Dalton等,其中绝大部分人仍活跃在地球物理学的研究中,很多学生和博士后后来在美国、加拿大和欧洲的知名高校担任教授. 这里不得不提到其中的一位学生Joe Steim,在Dziewonski教授鼓励和指导下,他于20世纪80年代中期设计了世界上第一台超宽频带数字地震仪(Very Broadband Seismometer),动态响应高达144db,而且配备了24位数据采集仪. 这台仪器成为后来IRIS全球地震台网(GSN)及很多国家和区域台网超宽频带地震仪的原型,为观测地震学仪器的发展作出了重要的贡献.



图5 2006年Dziewonski教授(右)和他的学生谷宇(Yu Jeffrey Gu)的合影

谷宇现为加拿大阿尔伯塔大学教授,也是本文的作者之一. 照片摄于谷宇家中

4 启示

Dziewonski教授在地震科学研究上取得了巨大的成就, 是最著名的地震学家之一, 对现代地震学的发展以及对地球内部结构和动力学过程的认识起到了极其重要的推动作用. 他的成功与他本人的勤奋努力和敏锐的科学思维是密不可分的, 此外, 另外两个方面的特点也是促使他取得成功的重要因素, 即对地震科学研究的强烈兴趣和成功的科研合作.

4.1 对地震科学研究的强烈兴趣

Dziewonski教授1965年来到美国从事研究工作, 但他对全球地震学研究真正开始感兴趣是在1967年之后. 正如他自己回忆的那样: “1967年的时候, 我听了Frank Press(美国科学院院士)的一个报告. 他采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法从大概3百万个随机生成的地球(一维)模型中仅找到5个满足观测数据的模型, 我对全球地震学研究的兴趣从那个时候才真正开始.”

正是因为对全球地震学的强烈研究兴趣, 才使得他后来投身于面波、地球自由振荡、地震震源机制解、全球一维和三维结构成像的研究中去. 虽然Dziewonski教授在科学职业生涯中也遇到过挫折, 例如, 他在20世纪70年代申请哈佛大学终身教职(tenure)时也曾遇到困难, 但这种强烈的兴趣和对科研的坚持一直贯穿于他的整个科研生涯之中, 使他取得了众多在地震学研究史上堪称经典的研究成果.

4.2 成功的科研合作

Dziewonski教授一生之中大多数重要的科研工作是和他的科研合作伙伴一起完成的,可以说,成功的科研合作是他取得一系列重大科学突破的坚强后盾.例如,他在20世纪70年代与加州大学圣地亚哥分校Scripps海洋研究所的Freeman Gilbert教授(世界著名的地球自由振荡及地球物理反演专家)合作,利用自由振荡理论和数据严格证实地球内核是固态的.与加州理工学院著名地球物理学家Don Anderson教授合作,于1981年发表的广为地球科学界所知的一维地球参考模型(PREM),平均每年被引用几百次,仅在2015年一年就被引用超过440次.

1978年世界上最为出色的理论地震学家之一John Woodhouse来到哈佛大学任教. Dziewonski教授与他在10多年的密切合作中,发表了一系列引领当时地震学界并对后来地震学研究发展起到重要作用的研究工作,主要包括地震矩张量(CMT)反演和三维地球结构成像.直到Woodhouse教授1990年离开哈佛大学到英国的牛津大学任教,他们的合作才结束.

Dziewonski教授也积极与其他地学领域的研究者合作,将地震学研究结果与地球动力学、地轴运动及地球重力场等研究紧密联系起来.例如,1976年他与哈佛大学的Richard O'Connell教授合作,展示了大地震对钱德勒摆动(Chandler Wobble)里的地轴运动曲线的变化有着重要影响.1985年他与当时哈佛大学的研究生Bradford Hager以及其导师O'Connell教授合作,揭示了地球内部三维不均匀性结构与地球的重力场以及动力地形(dynamic topography)之间的关系.1992年他与多伦多大学的Richard Peltier教授等人合作,指出加拿大哈德逊湾的自由空气重力异常很可能也是下地幔的大尺度结构异常造成的.

5 工作和生活中的Dziewonski教授

Dziewonski教授在生活中平易近人,不论他的同事或学生,甚至于有些系里本科生,见面都是直呼其名Adam.他的外表和处事有军人般的严谨,但是了解他的人都知道他骨子里更多的是幽默和随和. Dziewonski教授与他的太太Sybil(2010年8月去世)没有子嗣,出差和讲学是他生活中重要的一部分,如果可能的话他会带上太太,尤其是去意大利的访问与合作. Sybil喜欢

种玫瑰,每年夏天他们家的后院都会百花争艳.组里的计算机也都是以各种玫瑰命名,新机器的到来也就意味着Dziewonski教授家的花圃又会增加一个新品种. Dziewonski教授很乐意把院子打理的整整齐齐,他经常骄傲地告诉第一次来的客人:“我们家的游泳池曾经是这片区域最重要的航标之一.”

6 展望与结语

Dziewonski教授所从事的地震学研究还主要属于经典地震学研究的范畴,进入21世纪后,现代地震学正处于一个快速发展的阶段,越来越多的密集台阵及其产生的海量地震数据、越来越高效的计算资源以及越来越多的新的观测现象和研究方法为现代地震学研究带来了更多新的机遇和挑战,也为人类更好地认识地球内部三维精细结构及其变化、复杂的地球动力学演化模式及圈层耦合效应、地震和火山等自然灾害的孕育及发生机制、资源能源的富集与形成机理等重大科学问题提供了可能.

Dziewonski教授是人类地震学研究历史长河中一颗闪耀的明星,他与其他老一辈地震学家已经为现代地震学的研究搭建了坚实的基础和平台,他们对科学研究孜孜不倦的追求精神和严谨的治学态度,以及对年轻科学家培养和公共科学平台建立的热忱,将继续影响和指引着我们前行.

致谢 感谢审稿人和编委的修改意见,使得我们更好地完成这篇文章的撰写工作.我们谨以这篇文章来纪念为固体地球物理和地震学发展作出杰出贡献的Adam M. Dziewonski教授.

参考文献

- Agnew D C. 2002. History of seismology, international handbook of earthquake and engineering seismology. *Inter Geophys*, 81(Part A): 3-11
- Dahlen F A, Tromp J. 1998. *Theoretical Global Seismology*. Princeton: Princeton University Press
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model. *Phys Earth Planet Inter*, 25: 297-356
- Dziewonski A M, Chou T A, Woodhouse J H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J Geophys Res*, 86: 2825-2852

- Dziewonski A M, Gilbert F. 1971. Solidity of the inner core of the Earth inferred from normal mode observations. *Nature*, 234: 465–466
- Dziewonski A M, Hager B H, O'Connell R J. 1977. Large-scale heterogeneities in the lower mantle. *J Geophys Res*, 82: 239–255
- Dziewonski A M, Woodhouse J H. 1987. Global images of the Earth's interior. *Science*, 236: 37–48
- Ekstrom G, Nettles M, Dziewonski A M. 2002. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys Earth Planet Inter*, 200–201: 1–9
- Gilbert F, Dziewonski A M. 1975. An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 278: 187–269
- Ishii M, Dziewonski A M. 2002. The innermost inner core of the earth: Evidence for a change in anisotropic behavior at the radius of about 300 km. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99: 14026–14030
- Kustowski B, Ekström G, Dziewoński A M. 2008. Anisotropic shear-wave velocity structure of the Earth's mantle: A global model. *J Geophys Res*, 113: B06306
- Morelli A, Dziewonski A M, Woodhouse J H. 1986. Anisotropy of the inner core inferred from *PKIKP* travel times. *Geophys Res Lett*, 13: 1545–1548
- Morelli A, Dziewonski A M. 1987. Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core. *Nature*, 325: 678–683
- Romanowicz A M. 2016a. In Memoriam: Adam M. Dziewonski (1936–2016). *Seismol Res Lett*, 87: 599–599
- Romanowicz B. 2016b. Adam M. Dziewonski (1936–2016). *Eos*, 97: 1
- Su W J, Woodward R L, Dziewonski A M. 1994. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. *J Geophys Res*, 99: 6945–6980
- Woodhouse J H, Dziewonski A M. 1984. Mapping the upper mantle: Three-dimensional modeling of earth structure by inversion of seismic waveforms. *J Geophys Res*, 89: 5953–5986