

滕吉文,皮娇龙,杨辉等. 中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考. 地球物理学报, 2012, 55(3): 851-862, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 015.

Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 851-862, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 015.

中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考

滕吉文¹,皮娇龙^{1,2},杨 辉¹,刘少华¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029
2 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要 大陆动力学已成为 21 世纪地球科学研究中的热点和中坚,在它面对当今资源、能源、灾害和环境等社会与经济快速发展需求日益增长的同时,是机遇,却也是挑战. 因此厘定其研究的内涵和导向是十分重要的. 基于多年的研究实践和探索,本文将对以下五个方面进行讨论:1)大陆动力学研究的内涵与界定;2)大陆动力学研究的导向和轨迹;3)大陆动力学研究中地球物理反演结果和解释中的矛盾;4)强化发展学科交叉以构成交叉科学;5)对 2011 年大陆动力学委员会学术活动的思考.

关键词 大陆动力学,地球物理场,深部壳、幔结构,学科交叉,力源机制

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 015 中图分类号 P541 收稿日期 2011-06-10,2011-11-10 收修定稿

The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China

TENG Ji-Wen¹, PI Jiao-Long^{1,2}, YANG Hui¹, LIU Shao-Hua¹

1 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
2 *Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Continental dynamics has become a focus and central subject of Earth science in the 21st century. It is an opportunity a challenge when it is facing resources, energy, disaster and environmental and other social and economic development needs of growing. Therefore, determining the content and direction of its research is very important. Based on years of research and exploration, this article will discuss the following five aspects: 1) The connotation and definition of the continental dynamics research; 2) The orientation and track of the continental dynamics research; 3) The contradictions between geophysical inversion results and interpretation in study continent dynamics; 4) Strengthening the development course cross to constitute interdisciplinary science; 5) The ponder for academic activities in 2011.

Keywords Continental dynamics, Geophysical fields, Deep structure of crust and upper mantle, Disciplinary Intercrossing, Mechanism for origin of force

1 引 言

中国大陆动力学研究在 21 世纪的地球科学发

展进程中将当必会起到中坚作用,在它发展的征程上面临着挑战,却也面临着机遇. 基于当今大陆动力学研究的热潮,但在研究内涵和定义方面尚较混乱,为此必须就其研究内涵和发展导向给予界定^[1-3]. 针

对大陆动力学研究的发展导向与轨迹的命题,本文主要讨论 5 个问题,即大陆动力学研究的内涵与界定;大陆动力学研究的导向和轨迹;当今大陆动力学研究中有关地球物理资料的应用、反演结果和解释中的矛盾;强化发展学科交叉以构成交叉科学;2011 年大陆动力学委员会学术活动的一些思考。

2 大陆动力学研究的内涵与界定

2.1 怎样理解大陆动力学的内涵

当今大陆动力学的提法确实是百花齐放,而人们应当怎样理解大陆动力学的内涵乃是十分重要的,因为它关系到这一领域的研究导向和范畴,也当必会涉及到有关国家战略需求和自主创新的理念。为此必须对大陆动力学的内涵有明确的界定,并提出其发展的路线图。

近些年来,大陆动力学研究,得到广泛关注和重视,其在地球科学界的兴起和发展趋势令人兴奋。这也说明大陆动力学研究在地球科学的发展进程中占有重要地位。当今人们在对大陆动力学内涵的理解上尚存在显著差异,人们从各自的研究范畴出发并对其标以不同的定义。据不完全统计,现有:构造动力学、沉积动力学、岩石动力学、层序动力学、地貌动力学、山地动力学、分子动力学、模型动力学、地磁(含古地磁)动力学、地热动力学、生物动力学、金属矿产动力学、板块动力学、碰撞动力学、俯冲和消减动力学、流体动力学、地球化学动力学、地震动力学、地壳动力学、地幔动力学、岩石圈动力学、地核动力学、地球内部动力学和油、气动力学等等。显然,它们不仅重复、叠置、交错,更重要的是内涵各异,说法混乱,没有一个明确的理念。

一个科学问题的提出或认定,必须具有其本质的科学反响,物理内涵和发展路线。

2.2 大陆动力学的主体内涵和界定

运动学和动力学均为力学的重要分支,运动学专门描述物体的运动,即物体在空间的位置随时间的演进而作的改变,完全不涉及作用力或质量等影响物质运动的因素。而动力学主要是应用牛顿第二运动定律与能量观念研究质点或刚体在空间中的运动与受力的状况。

1911 年,洛夫(A. E. H. Love)发表了著作《地球动力学的若干问题》,最早使用了“地球动力学”这个词。不过在 19 世纪下半叶,开尔文(Kelvin)就已研究过地球的整体刚度,认为其与钢的刚度相

近。达尔文(G. H. Darwin)等还研究了黏性球体在引潮力作用下的形变。美国物理学家古登堡分析了地球内部的作用力,推断了地球内部介质的力学性质。

20 世纪 60 年代以来,板块大地构造学说的提出为地球动力学的应用增添了许多新的内容,特别是岩石圈精细结构的研究和成就^[4]。有的学者从大地构造学的角度出发研究了地壳的构造活动和运动,为探索地球内部深层动力过程提供了一个极为重要的圈层耦合背景和运动机制的响应。有的学者则从板块构造出发,在理解壳、幔结构和核幔边界的基点上侧重于研究地幔对流、海底扩张和大陆漂移。另外一些学者则致力于研究极移、固体潮和地球的自由振荡等整体性力学现象。也有人把理论地震学等同于地球动力学。20 世纪 70 年代到 20 世纪末叶,世界上地球物理学界以及地球科学界有关领域的各国学者联合起来组织了上地幔计划、岩石圈计划、地球动力学计划、全球地学大断面计划、地震减灾十年计划等,其主要内容是验证板块构造学说。

70 年代后,地球动力学理论研究发展较快。例如史密斯(M. L. Smith)一瓦尔(J. Wahr)理论,以一定的地球模型为基础,用连续介质力学的方法,以整个地球为对象,统一研究了地球的章动、固体潮及地球内波。这一理论的系统性较好,结果也较符合实际。随着实际测量和计算技术的发展,数学、力学理论的不断前进,反演问题的精度将日益提高,对地球内部,特别是壳、幔精细结构的刻划。地表呈现的一系列山脉、河流,地质构造和地球物理场响应等均非浅表层过程所致,均源自地球深处,故在阐明地球内部结构和地表结构与形成和演化上地球动力学将必会起更大的作用。

地球内部物质在力源作用下重新分异,调整和运动,必须有力系对物质的作用。大陆动力学中的作用力是第一位的,而它又必须涉及介质和空间结构,且包括浅表层过程、深层过程、动力机制与它们之间的耦合响应。地球固体介质内部发生的力学现象多种多样,形式复杂,内容丰富,且受到 N 元要素的制约。地球动力学的任务就是分析这些现象,并透过这些现象寻求其力源机理,提取这些现象出现的时空关系和变化异常与规律,以资预期它们的发展态势。为此,必须理解推动和支撑这些现象呈现的力源体系和地球圈(层)介质的力学属性。

地球动力学是建立在普通固体变形力学、流体力学、流变力学以及岩石力学等学科的理论基础上,

与这些学科之间既有着共性,又有其自身的特殊性^[1-5]。地球动力学所研究的地壳、地幔和地核是处于不同温度、不同压力、且为宽时域、大尺度和大变形条件下的非均匀实体,其中,脆性与延性兼有,固体变形与黏性流动并存,快可以以分秒计,慢可以以亿万年计,既有现存构造的继承和改造,又有新生构造的发育和扩展,所有这些均绝非一般纯物理学和力学的研究对象所能比拟。为此若忽略了深部壳—幔介质属性、结构、构造和深层过程与其动力学机制的特殊性,也就失去了地球动力学研究的实质内涵。

地球模型是地球动力学的基础之一。在当代地球动力学研究中,人们通常将地球视为由弹性外壳和地幔、液态外核和固态内核 3 部分组成。它们的物理—力学属性、体量大小、密度分布、弹性系数组构、粘滞系数等参量尚远未能给出一个比较逼近的量化定值,各学者所采用或估计值尚差异显著,从而当必会派生出许多模型,1066A、PREM 就是当前常用的两个模型^[4]。应当说对地球内部不同圈层介质和结构尚处在一个定性判别和推测阶段,怎样逼近于实际尚待资料的不断积累和深化认识。

基于这样的研究现状,可将地球动力学视为一门应用力学,它是地球物理学的一门分支,却又必须涉及众多的学科领域。所以“地球动力学乃是研究和探索地球内部物质在力源作用下,呈大尺度的运动(如成山、成盆、成岩、成矿、成灾),且要深化研究其在整体运动中深部各圈层的耦合,介质与结构的物理—力学属性,物质与能量的交换,深层过程和力源机制”,以达深化认识地球本体的一门边缘科学领域。

地球动力学处理的问题,多数属于已经知道了某些力学结果,而要寻求它们的力学机理、力学参数,以至调整或重建地球模型。它们是地球动力学研究中的反演问题,因而解答不是唯一的。地球科学工作者只能根据组构众多的观测和实验数据与结果来制约初始模型的提取和解的变化范围,并使它的非唯一性逐次缩小。

大陆动力学是研究地球大尺度或整体运动的各种力学过程、力源作用和介质的力学性质与动力机制的一门边缘学科。它既不同于仅体现运动学作用导致的地质构造样式,也不同于仅体现物质的地球化学组成,它是以物理学的基本理论为依托,以数学和计算技术为工具,以实验和观测为主要手段,以高分辨率海量数据采集为基础,并广泛引入和应用现代高、新技术,而且是基于其自身的特殊科学体系而

发展与前进的一门学科。为了完善其研究体系,必须体现学科交叉,即要与物理学、力学、数学、信息科学以及地球化学和地质学相结合,以研究深部物质在力源作用下的分异、调整与运动的物理—力学—化学过程和物质组成及其对浅表层过程的运动学响应和对地表派生现象之间的作用与关联。

地球动力学必须沿着力系作用的脉搏,而且是建立在多学科交叉、综合和不同学科之间的协同与集成的基础上,方能取得动力机制响应的成效,并获得新的认识和新的理念。

20 世纪中叶国际上的地球动力学计划(Geodynamic Project),是研究地球物质的动力学响应和动力演化历史的国际性研究计划。该计划鉴于 1960~1970 年上地幔计划研究取得了成效,国际大地测量学和地球物理联合会及国际地质科学联合会联合倡议,在国际科学联合理事会领导下,成立一个跨学科联合会,即地球动力学委员会^[4],该委员会主席先后由美国的德雷克(C. L. Drake)和哈尔斯(A. L. Halse)担任,共有 50 多个国家和地区参加该项科研计划。此外各国也相应成立了地球动力学国家委员会。该计划以板块构造理论为指导,以验证这个理论并使之更多地解释诸多的地球科学现象,以使其更趋于完善。该计划的实施分为 10 个工作组:

- 1) 西太平洋—印度尼西亚地区地球动力学;
- 2) 东太平洋地区、加勒比和斯科舍弧地球动力学;
- 3) 阿尔卑斯—喜马拉雅地区西部地球动力学;
- 4) 大陆和海洋裂谷带地球动力学;
- 5) 地球内部性质和过程;
- 6) 阿尔卑斯—喜马拉雅地区东部地球动力学;
- 7) 板块内部地球动力学;
- 8) 大洋和大陆构造之间的联系;
- 9) 构造运动、变质作用和岩浆过程历史及其相互作用;
- 10) 全球资料综合与复原古构造。

此外,还有一个世界资料中心和资料交流委员会。

地球动力学计划从 1971 年开始到 1979 年结束,历时 10 年,共出版约 30 多卷国际地球动力学报告和 60 多卷科学讨论会报告集。通过这项研究对海洋底部大洋中脊热物质上涌、磁条带异常对称展布、转换断层、俯冲带、板块边缘构造形态和壳、幔结构的复杂变异等取得了较全面的新认识,并开始研究大陆板内构造和动力问题,对地球内部的物质组成、分布、结构、地幔对流有了更深入的了解。在高温高

压实验研究,长基线(VLBI)形变测量等方面,也取得了很大的进展.未能充分解决的问题有:板块运动的力源机制,特别是地幔对流“猜想”;海洋板块能否“登陆”;地幔热柱运动轨迹与检验;俯冲和消减机理,边界条件和厘定;古生代和前寒武纪地磁极位置的确定;地球深层动力学过程;缓慢地震的特征.

地球动力学计划实施了 10 年,对一些带有本质性的问题,并未得到较好的解决,特别是板块运动的机制问题,国际间得到一个基本的共识,即必须进一步研究岩石圈^[4-6].所以 1980~1989 年在全球范围内又进行了 10 年的岩石圈计划与研究.在这一期间随之而开展了一系列专题性研究,如地球大断裂计划(GGTP),十年地震减灾计划,以及各大区域不同权重的计划等等.

随着科学与技术的快速发展,认识的不断深入与广泛,大大推进了这一科学领域的发展,并取得了不少成果.然而在认识地球的漫长岁月里,当面对一些机理新问题时则需要从新的视野出发、探索和建立这些科学问题的初始和边界条件.

这些问题有:板块运动的力源机制,这涉及到地幔对流的力源、空间结构(单层对流还是双层对流)以及对这一“猜想”的检验;岩石圈板块在上地幔软流圈滑曳的全球分布,板块俯冲的轨迹(包括路径、空间终极深度,即位置);海洋板块“登陆”的必要和充分条件与异同;板块构造的边界场响应与资源、能源和灾害形成的深层过程.这一系列问题的提出、研究和探索告诫人们一个基本的事实和导向,即必须深化认识地球本体,特别是壳、幔结构的精细刻划、高精度地球物理场边界响应的测定.这便表明:在地球科学研究和发展中对地球内部深层过程和动力学响应的研究乃核心所在.

3 大陆动力学研究的导向和轨迹

在这一领域的研究和探索中,从认识论出发,必须科学地认识浅表层过程 and 其在大陆动力学研究中的作用度;深部介质属性,精细结构变异及其深层过程乃是大陆动力学研究的基础与核心;且必须清晰地认识中国大陆动力学研究应当遵从的轨迹.

3.1 在科学研究中能够提出问题和质疑是至关重要的思维体系

在自然科学研究的历程中,伟大的科学家爱因斯坦形成了一个重要的思想:“提出一个问题往往比解决一个问题更为重要,因为解决一个问题也许只

是一个数学上或实验上的技巧.”他正是由于提出了解决牛顿力学体系中存在的问题或矛盾而建立了相对论.伟大的数学家希尔伯特指出:“只要一门科学分支能够提出大量问题,它就充满着生命力,而问题缺乏则预示着独立发展的衰亡或中止.”在 1990 年,他就提出了 23 个数学问题,对 20 世纪数学的发展起到了重大的推动作用.

许多研究自然科学的科学家和哲学家都认为,科学问题是科学发现的逻辑起点,一切科学研究、科学知识的增长就是始于问题和终于问题的过程.旧的问题解决了,又引出了新的、更深刻的问题.

因此,善于和勇于提出科学问题,用科学批判和理性质疑的科学精神去审视旧的科学问题,充分发挥创新性的想象力去提出新的科学问题,尤其是提出大跨度、综合而复杂的重大交叉科学难题就显得更具有意义了.

3.2 必须科学地认识浅表层过程和其作用效应

浅表层过程主要是指,在近期地质年代以来(特别是第四纪)大地构造的活动态势、地表 GPS 测量的速率变化与其给出的趋势性数值分布、浅表层介质变形以及有关现象.

这些现象尽管在某种程度上会受到深层动力过程的一些影响,但它主要是在多要素综合约束下的浅表层效应,即属于深部作用过程在浅表层的某种派生现象.因此在大陆动力学研究中必须对浅表层过程的作用和地位有一个清晰的了解.只有这样才能使得人们对动力机制的认识上逐步深化.

GPS 测量仅仅是浅表层过程的部分变化响应.有人认为 GPS 测量速率变化大时地震呈强烈活动;在 GPS 速率逐步减小时为应力在逐步集中,即可能会发生强烈地震;在 GPS 测量速率近于零时称为“闭锁”,亦为可能发生强烈地震.那么人们一定要问, GPS 测量速率的矢量,在什么时候不发生地震呢?

美国、日本在全国范围内布设了密集的 GPS 观测台,但对近年来发生的几次强烈地震却从未能预报过,特别是 2011 年 3 月 11 日 13 点 46 分发生在日本宫城以东 130 km 海沟处的 $M_s 9.0$ 级大地震,在震前 GPS 并未给出可供指示的任何信息.

基于 GPS 测量只能给出水平方向变形(图 1),尚不能表征垂直变形量及态势,在利用 GPS 测量资料研究地壳运动时就必须同时考虑水平向和垂直向二者的变形行为.实际上垂直变形有时还是很强烈的,如龙门山断裂系.

显然, GPS 测量是浅表层的反响,而在地震活

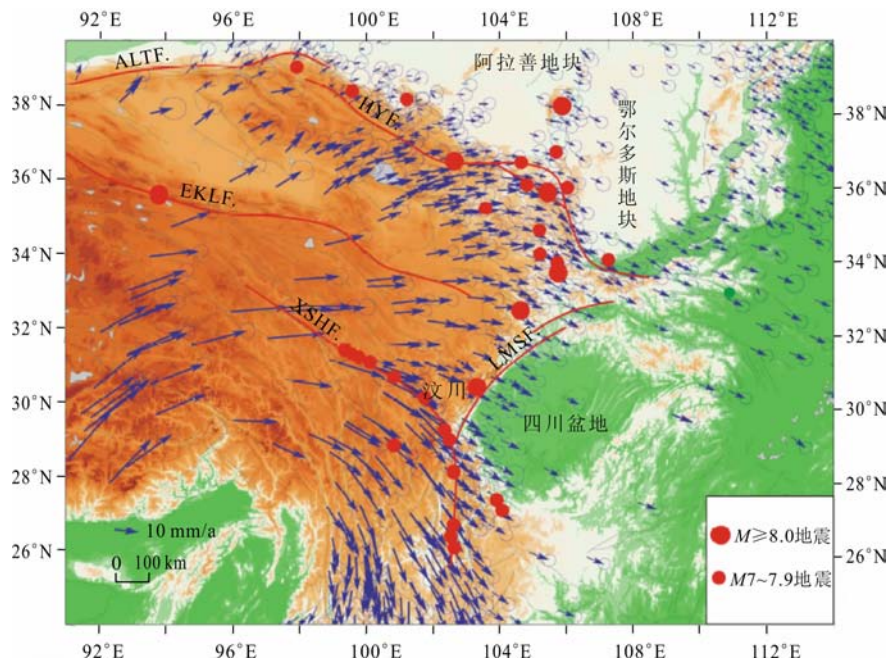


图 1 青藏高原北缘和东缘 GPS 测量的位移速度场和 7 级以上地震分布图^[6,7]

Fig. 1 Map of GPS displacement speed and earthquakes($M>7$) distribution at northern and eastern Tibet Plateau

动和地震预测方面的应用还有很多问题要做,特别是它与强烈地震孕育、发生和发展有无因果关系;必须取得水平方向和垂直方向的变化速率,而表象的“看图识字”有时会造成误导。

3.3 深部介质属性,精细结构变异及其深层过程是大陆动力学研究的基础与核心

在地球表层所见的各类地质构造现象乃是深部物质运移在地表的遗迹。

人们在地表见到诸多的现象,如造山带的形成、稳定克拉通的盘踞、河流的展布与变迁、大陆溢流玄武岩、地幔热柱等地质印记;地表观测的异常重力场、异常磁场、异常地热场、异常电磁感应场、异常放射性异常场等地球物理场;强烈地震活动与发生、火山活动与喷发等自然灾害;金属矿产资源的聚集与矿床的形成、油、气、煤能源的生成、聚集与运移等资源与能源。这些现象在本质上均源自地球深部物质与能量的交换与其深层动力过程。

地表物质的遗迹受深部物质动力作用的制约。著名地球物理学家、中国科学院地球物理研究所第一任所长赵九章院士曾用白居易《长恨歌》中两句诗词,对地球物理学做了科学与艺术并蒂的精辟比喻,即:“上穷碧落下黄泉,两处茫茫皆不见”。这告诫我们要了解地球内部,则必须通过高精度的观测,高分辨率数据的采集和精细结构的刻划,通过正确的反演计算才能获得逼近的结果和认识^[4-5]。

显然,上述遗迹的烙印,沧海桑田,海陆变迁,它

们作用的时间是如此漫长,作用规模和波及范围又是如此之大,所造成的影响又是如此之强烈,故它们不可能是由地表或浅表层过程所致,而必然是地球内部物质与能量的交换,深层过程和动力学响应的反响。为此,研究和探索地球内部的奥秘,就必须越过地平线,去“抚摸”地球内力作用下的动态“脉搏”(包括物质在纵向与径向运动),且已成为大陆动力学研究和探索的核心所在。

3.4 与大陆动力学研究相关的名词核定

目前,在深部结构研究中关于震源属性定名上呈现了一些混乱,如主动源地震、被动源地震、人工源地震、天然地震等。它们均在相关报告、发言和材料中交混使用,如主动源地震深部探测,被动源天然地震观测。

一个名词的出现,必须富有清晰地体现出科学意义的本质内涵,且必须是能为人一目了然与理解的科学术语。

应当清晰地认识到,客观与主观,主动与被动在一定程度上主要是用于政、哲词条。例如,主观主义,客观形势,主动坦白交代,造成了被动的政治局面等等。另外在地球动力学研究中,也不能称主动源 P 波;被动源面波等。为了明确反映一个名词的科学含意,应采用:人工地震,天然地震为佳,切不可政、哲与科技用词混淆交错,或自以为是“创新”。

3.5 当今大陆动力学研究应遵循的轨迹

应当清晰地认识到:科学研究本身是在知识积

累前提下的一个有机思维与实施,即创造性的智力劳动过程,而其结果则必须造福于人类.换言之,它必须遵循国家战略需求和自主创新的方针并以实施科学实践发展观为宗旨.为此,大陆动力学研究必须在以下方面作出贡献.

3.5.1 金属矿产和油、气资源

在理论、方法和应用上要解决以下迫在眉睫的两方面问题:[8-10]

1)地壳内部第二深度空间(500~2000 m)金属与非金属矿产资源的聚集和大型、超大型矿床与多金属矿床的形成与探查.

2)地球内部第二深度空间(5000~10000 m)油、气能源的形成、聚集、运移和探查.

3.5.2 把握强烈地震发生和发展的深部动态“脉搏”

强烈地震的孕育,发生和发展有其必然的深部介质和构造环境与深层动力过程,因为它是震源深处介质在力源作用下的破裂过程与动力学响应^[11-16].弄清强烈地震孕育、发生和发展的深部介质、结构和构造的空间环境与介质的物理属性,捕捉强烈地震震源区及其周边地域介质在力源作用下的初始破裂,即微破裂效应;随着应力集中而导致“破裂链”的形成过程及其质点振动并以地震波动为载体的辐射效应.

3.5.3 特异地域深层过程和动力学响应探索

南海地块的下沉、青藏高原的隆升乃东南亚中、新生代以来最具特色的地球动力学事件,并在印度洋板块,太平洋板块和欧亚板块共同作用下形成了中国大陆及临海地域破碎镶嵌的块体组构.因此,青藏高原、南北地震带、东南沿海地带乃大陆动力学研究的典型区域(带),是板内大陆动力学探索的核心构造地域.

3.5.4 对地球本体的深化认识

地球内部物质的重新分异、调整、运移与能量的交换,深层过程与动力学响应和对地球本体的研究、探索和深化认识(图2).这是当今地球科学中,对成山、成盆、成岩、成矿、成灾和深化认识地球本体的研究与探索其动力机制的根本所在.

4 当今大陆动力学研究中有关地球物理资料反演结果和解释中的矛盾

在地壳与上地幔的深部探测中,人工源深部地震探测、天然地震观测(包括层析成像和接收函数)和大地电磁测深反演结果之间存在相当矛盾.由于

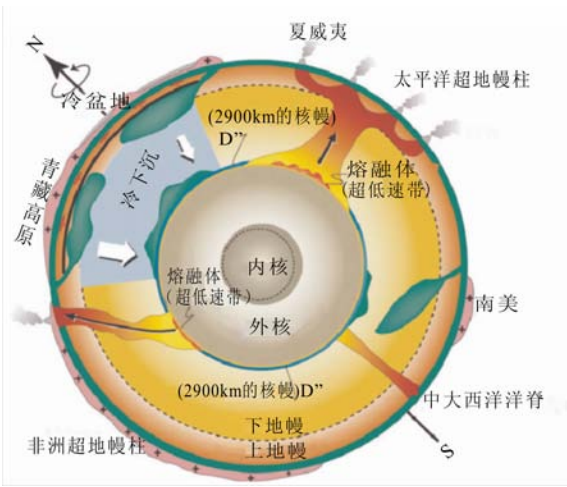


图2 地球内部超地幔热柱、超级俯冲(或冷下沉)和地幔对流模型^[17]

Fig. 2 Major convection pattern of the Earth's mantle showing super plumes and one super-down welling

人工源地震的震源、接收、爆炸时间等均为精确已知,反演计算所得结果的精度最高且为最准确的探测成果.这种高精度探测方法和成果在中外多年的油、气、煤能源勘探中,已为众多的深钻井和地球物理测井资料所证实,即取得了精确的结果.在地球深部壳、幔精细结构的研究中已为多年的实践取得了公认的成效(如近垂直反射波法,宽角反射波法和长距离地震折射波法).然而天然地震和大地电磁测深的反演结果精度差之较大,这是因为有很多参数是未知量(如源函数等),所以解的不唯一性就当必更强.因此反演结果有时与人工源地震深部探测结果一致,有时相近,有时却完全相反.所以必须从理念、方法和机制上深化认识.

4.1 天然地震的射线路径与基本特征

由图3可见,震源主要位于地壳深处高速介质中,在反演中不考虑源函数,也不考虑大圆弧路径上波传播的介质属性、构造环境及变异,只考虑上行波在近地表处的接收函数;在波场响应上只利用上行波,而不考虑下行波;地震射线只为由高速介质向低速介质入射;震相识别和地震参数测定的误差及错误难以准确估量,亦难以在反演中不将这些因素加入,但在成像后则更难以剔除;精度较低,分辨率亦必较低;同一模型同一方法,同一份数据,不同人的反演成像结果却可各不相同.

4.2 数值模拟与特征

由图4可见,进行数值模拟时的基本特征是以给定理想模型为前提的^[7].在认为下地壳为流变介质前提下,设定理想黏滞性介质参量和模型条件下

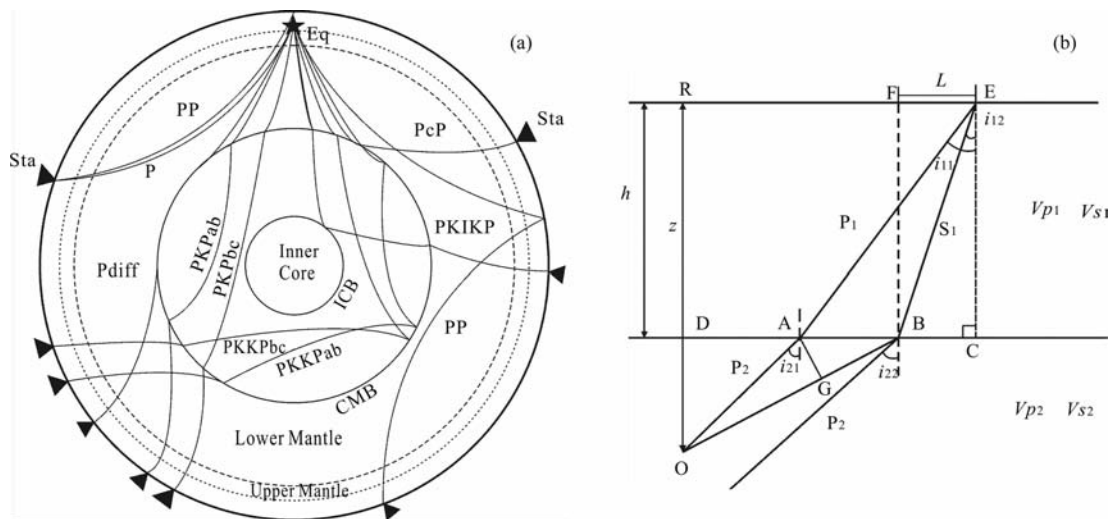


图 3 天然地震波动穿越地球内部的射线路径图

(a) 地震射线在地球内部的传播路径;(b)地表接收时的射线轨迹.

Fig. 3 Map of the natural seismic way ray path through Earth's interior

(a) Seismic ray propagation path in the Earth's interior; (b) Ray track in surface recieving

的数值计算,而不考虑地震波在深部介质中的传播路径和实测速度模型.黏滞系数是依据文献、专著和前人数值模拟时所用参量的复制或翻版或给定,而非实际采集并表征层序和岩性的诸多代表性样本在相应高温、高压条件下测试专属给定的物理量.设定黏滞系数的误差范围一般均在 2~3 个数量级,可大到 5~6 个数量级或更大达 13 个数量级.将全球视为相同的层序乃致属性,试图以统一的物理参量所取得的特殊的解答.不去检验它的分辨率和误差范围,却对设定的模型计算结果给予定量的解释.

4.3 人工源地震的射线路径

震源位于浅表层地震低速介质中,在依据地表观测资料(数据)反演时,地面接收点处的介质、构造环境、接收距离和范围均为已知.对来自不同深度的反射波震相、折射波震相出现的位置有一个比较清晰的认识,且可事先进行正演仿真计算走时.通过地震波场的激发、传播,可以全方位的利用震源、传播介质、结构和接收全过程的信息与在已知多要素约束下的初始模型提取和进行反演.这是高精度的观测,高分辨率信息的采集和精细结构的刻划,是所有地球物理方法中(包括石油、天然气、煤炭能源、工程设施、地球深部介质属性和结构以致地核)最为精确的方法,特别是在石油、天然气、煤炭和对沉积建造的勘探中,均已被钻井和地球物理测井等资料检验所证实,即反演结果是正确合理的.

对地震反射波而言,地震波射线自激发源出发穿越不均匀介质、各向异性介质和各类岩相、构造变

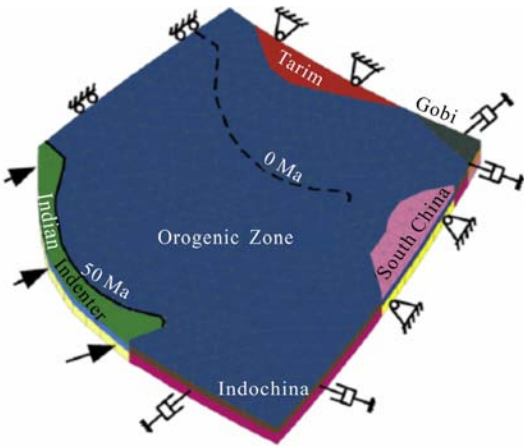


图 4 数值模拟模型及边界情况简图

Fig. 4 Sketch of the numerical simulation model and the boundary conditions

异地带时在波形($f(t)$),频谱($s(\omega)$)和走时上均会有明显反映或变异.利用从震源出发向下传播的下行波,同时利用由下而上的上行波(图 5),即地震射线均为两次穿过相同的介质和结构,特别是折射波能够精确给出来自地壳深处各层的速度和介质属性.可以利用分层速度结构与层厚度之间的关系,同时还要利用不同深度地层或不同速度地层反射波和折射波之间的运动学和动力学特征,且二者必须取得相同的反演结果.

利用地震波射线由低速介质向高速介质传播和由低速介质向高速介质传播全路径的信息,同时利用来自同一界面的反射波和折射波波列(图 6)二者可以互补和互证.

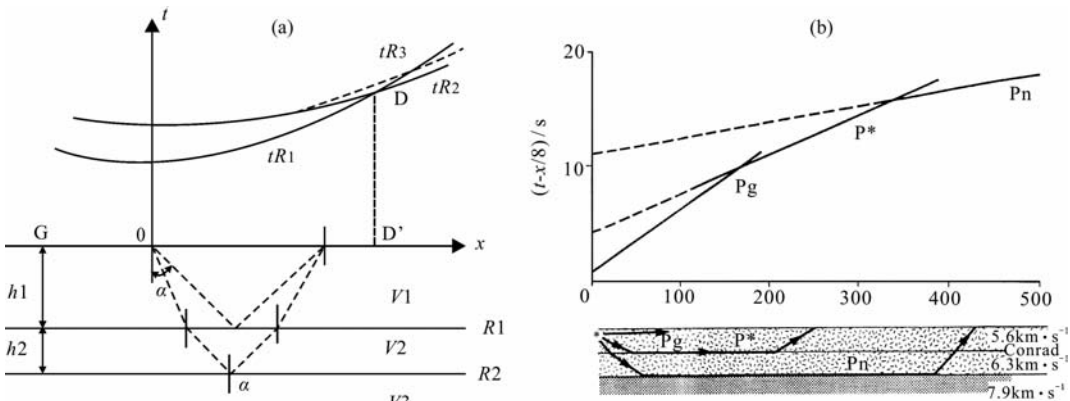


图 5 层状介质中地震反射波和折射波射线路径图

Fig. 5 Map of seismic reflection and refraction ray paths in layered media

时间精度为(10~15/1000)s,不受利用天然地震反演求得的参数计算误差的制约. 尽管在震相上也会存在着一些误差,而对震相Pg,Pm和Pn波的分辨是可以准确唯一的控制. 并可以刻划壳、幔分层介质的精细结构,求取地震波传播速度、各层厚度、反射和折射界面的埋藏深度、反射和折射波的各类系数等参量. 可通过正演理论地震图与实际观测地震图进行对比分析和求得逼近的解答(包括运动学和动力学特征).

显然这三者在介质属性结构反演和解释上均存在着较大差异,而怎样从波场特征、射线路径、波动理论、介质物理参量、真实属性和动力机制上取得某些逼近的认识,并为探索其解不唯一的内在必然联系和机理上的响应与思考乃是十分重要的. 在这里首先提出这个问题,望大家来思考与研究,以资共同求得合理的逼近解答.

4.4 电阻率结构

大地电磁测深能够给定电阻率的纵向和横向分布轮廓,但其图像与解的不唯一性很强,而且同一地区,同一份资料,不同人作反演、作解释也会得到不同的结果.

4.5 人工源地震与天然地震观测、理想模型数值模拟和大地电磁测深之间存在矛盾现象的认识与权重

基于以上三者内涵与特点的认识,物理量和已知及未知条件等的存在与事实. 天然地震(包括层析成像、接收函数和噪声)、数值模拟和电性结构仅可以给出大范围的概况,其结果的大趋势性可以信赖,但解的不唯一性很强. 这当必会阻碍这一科学问题对真实的逼近和深化对地球本体的认识. 基于任何推断、假设和人为给定的介质属性(如流变性、粘滞

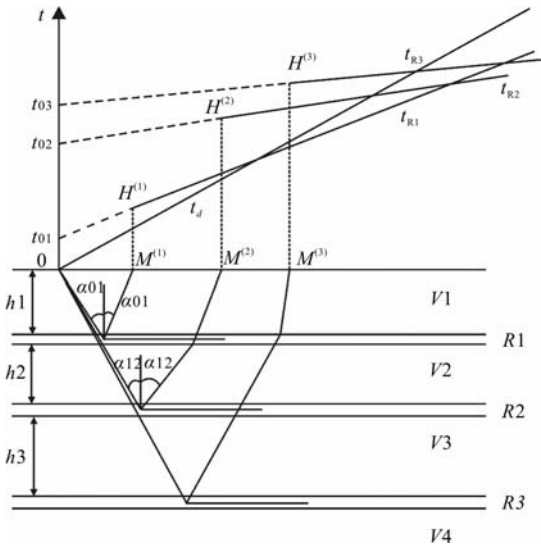


图 6 层状介质中地震反射波和折射波(折射角=90°)射线路径图

Fig. 6 Diagram of seismic reflection and refraction (refraction angle=90°) ray path in layered media

系数)、理想条件上设定的初始模型,数值模拟只能在框架讨论时作为有限目标的参考,不可作为量化地球科学问题的定论.

基于人工源地震深部探测精度高,已知参数准确可靠(包括源函数和接收函数),且在油、气、煤能源实际勘探中和反演结果在全球范围内的可以信赖,而已被这一系列的钻井(取芯与不取芯)和地球物理综合参数测井结果所证明. 在这一前提下,人工源地震勘探和深部探测对介质结构的精细刻划、深层动力过程的响应与其所得结果的正确性是可完全信赖的,当必给予最大的(与其它方法相比)权重.

4.6 重力场与密度结构 地壳与上地幔介质的重力场效应在地球动力学研究中占有重要地位

重力场对地球深处介质与结构的非均匀性展布

在布格重力异常上表现清晰. 对活动的造山带、盆地、稳定的克拉通以及大洋中脊和板块俯冲、消减带与块体边界重力场各异, 这是深部物质密度结构差异的反映.

均衡重力场不仅与造山带、克拉通、盆地各类构造差异有关, 而且与构造活动, 地震孕育与发生, 火山活动与喷发有着内在的联系. 因为在这些地带均呈现出强烈的不平衡性, 例如在青藏高原东北部, 松潘—甘孜地带、龙门山地带、四川盆地均衡重力异常各异, 特别是在龙门山造山带重力极不平衡, 这里即是四川汶川 $M_s 8.0$ 大地震发生的场所, 又如喜马拉雅造山带重力远未均衡, 高山仍在升起.

重力异常场的呈现是深部物质在力源作用下, 物质与能量强烈交换和运移的深层动力过程响应.

由此可见, 在大陆动力学研究中, 重力场的研究将是十分重要的科学领域. 总起来看, 地壳与地幔的精细结构刻画, 重、磁、电、震、热等地球物理的综合响应将是地球动力学深化研究的必然. 因为它们都是地球深部物质运动和动力机制的产物.

5 强化发展学科交叉以构成交叉科学

5.1 学科交叉的方式多种多样, 交叉的跨度日益增大, 交叉的层次不断加深

学科交叉是众多学科之间的相互作用, 而交叉形成的理论体系, 则构成了交叉学科, 众多交叉学科与集成则构成了交叉科学.

学科交叉是学术思想的交融, 实质上是交叉思维方式的综合、系统辩证思维的体现. 自然现象复杂多样, 仅从一种视角研究事物, 必然具有很大的局限性, 不可能完全揭示其本质, 也不可能深刻地认识其全部规律. 因此, 唯有从多视角, 采取交叉思维的方式, 进行跨学科渗透、注入与熔融的研究, 才能形成正确和完整的认识与理念. 著名物理学家海森伯认为: “在人类思想史上, 最有成果的发现常常发生在两条不同的思维路线的交叉点上.”

5.2 学科间的大跨度交叉

1986 年, 诺贝尔基金会主席在颁奖致词中说: “从近几年诺贝尔奖获得者的人选可以明显看到, 物理学和化学之间, 旧的学术界限已在不同的方面被突破. 它们不仅相互交叉, 而且形成了没有鲜明界限的连续区, 甚至在生物学和医学等其他学科, 也发生了同样的关系.” 1953 年, DNA 双螺旋结构的重大发现就是化学家鲍林、生物学家沃森、物理学家克里

克、富兰克林和威尔金斯等合作的结果^[19]. 大陆漂移, 海底扩张与板块构造先由地球物理学家魏格纳提出, 而后由诸多的地质学家、生物学家、地球化学家和计算地学家们前后不断研究和在争论与互补中发展和诞生的. 这一交叉学科的产物现象被誉为地球科学的革命^[2].

这便表明, 在多学科之间、多理论之间发生相互作用、相互渗透, 形成了“科学链”, 从而能开拓众多交叉科学前沿领域, 产生出许多新的“生长点”和“再生核”, 如粒子宇宙学、生物物理化学、生物数学、计算地球物理学、太空科学、环境科学、科学伦理学、系统科学、自然社会学和社会自然学等等. 迄今, 交叉学科的数量已达 2000 门之多, 其中有许多都是交叉科学的前沿.

基于当代自然科学发展的新内涵, 由于学科之间交叉创造的新理念和新认识及新成就, 雄辩地显示出其在整体科学发展和创新进程中的效应和潜力以及对未来发展的导向是十分惊奇的. 为此中国大陆动力学研究的任务将必是十分重要而又艰巨的, 因为它必须在国家战略需求与自主创新方针指引下, 沿着大陆动力学研究的科学轨迹, 为资源、能源和火山、地震灾害等诸多方面从深层动力过程和力源机制上取得成效. 所以学科之间的交叉、互补, 特别是大跨度的交叉不仅会大为促进我国大陆动力学研究的理论、方法和应用的进程, 而且必须服务于人类的可持续发展和营造一个良好的生活和生存空间.

6 对 2011 年大陆动力学学术活动的思考

6.1 对 2011 年“松潘—甘孜地体边缘地域强烈地震发生的构造背景与深层动力过程”研究的回顾

大陆动力学专业委员会于 2010 年 11 月 20—21 日在北京拉菲特城堡酒店召开了第一次《松潘—甘孜地体边缘强震发生的构造背景与动力过程》学术研讨会, 来自中国科学院、中国地震局、国家测绘局、地矿部地质地质科学院、中国地质大学、北京大学、国家自然科学基金委等单位的 53 人和一批青年研究生参加了此次学术会议的讨论^[20]. 有 15 位专家在大会上各自对“松潘—甘孜地体边缘地域强烈地震发生的构造背景与深层动力过程”做了精彩的学术报告, 使与会者受益匪浅.

这 15 个学术报告是(以报告先后为序):

1) 滕吉文:松潘—甘孜块体南缘地域强烈地震发生的构造背景与动力过程. 详细阐述了这次学术会议的主题、内涵和背景. 基于当代全球和东南亚与我国及邻区强烈地震孕育、发生和发展的势态,提出了对巴颜喀拉块体南缘 8.1 级(2001 年 11 月 14 日昆仑山口西)、8.0 级(2008 年 5 月 12 日四川汶川)和 7.3 级(2010 年 4 月 14 日青海玉树)地震发生的深部背景和机理. 在这样的基点上开启了这次学术研讨会的序幕和以下不同学科,不同论点,不同认识与丰富多彩的学术报告的呈现.

2) 邓起东:青藏高原巴颜喀喇活动断块与昆仑—汶川地震系列;

3) 王二七:松潘—甘孜地块构造演化及地震活动的构造机理;

4) 马瑾:地表温度场与巴颜喀拉—松潘地块的现今活动探讨;

5) 付碧宏:松潘甘孜地体边缘的大地震与地表构造变形特征研究—来自高精度遥感和野外观测的证据;

6) 赵越:从青藏高原块体的变形与运动看西南大地震的预测;

7) 王谦身:汶川地区及邻域的重力场及其变化;

8) 刘启元:川西高原及其邻区三维地壳上地幔速度结构:密集地震台阵观测得到的结果;

9) 张忠杰:松潘甘孜地块边界断裂带域壳幔结构与动力学意义;

10) 王椿镛:松潘甘孜地体的地壳上地幔结构;

11) 高锐:巴颜喀拉地体与西秦岭造山带深部结构与构造的关系—以深地震反射剖面揭示;

12) 杨文采:断裂面岩铆与地震发生;

13) 蔡永恩:关于地震触发问题的一些思考;

14) 陈祺福:巴颜喀喇块体边缘的强震活动与 2008 年汶川孕震区深部的滑动速率;

15) 熊熊:应力传输与地震活动性—青藏高原东部为例.

会议进行了学术讨论和提建议,大家一致认为,这次学术交流会内容丰富,引人入胜,学术上自由,宽松,各抒己见,是一次很好的学术研讨会议,并对以这样的形式进行学术交流和成效给予了充分肯定. 当然,也必然会迫使从事大陆动力学研究的人们去思考、去准备下一次学术会议的内涵和要深化认识的科学问题.

6.2 对 2011 年大陆动力学学术活动的思考

显然,在学术研究,特别是对一个问题的深化认

识进程中,应当在一个有限的时间段内,对一个有意义的科学主题有一个比较全面的、比较深入和比较集中的交流与讨论. 为此,提出以下设想:

1) 会议主题仍以 2011 年这次学术研讨会的内涵为主体,并进一步研讨,以使与会者在了解不同学科对同一问题的认识中得到升华.

青藏高原大陆动力学的研究,不论对深部物质与能量的交换,高原的隆起,喜马拉雅造山带的崛起,陆内块体运动与深部物质流展,地震活动和强烈地震的孕育、发生和发展,金属矿产资源和油气能源的形成与聚集以及东亚大陆动力学研究均有着极为重要的意义^[20-29]. 为此这次学术研讨会将必会促进我国在成山、成盆、成岩和成灾的深层过程与动力学响应的研究和探索向前大跨一步.

2) 学术报告内容的思考:为了听取更多学科和科学家们的见解,拟在更为广阔的学科范围内再请一些新人来做报告. 初步考虑的学科领域与分支为:

(1)地质构造;(2)应力与应变;(3)变形与大地测量;(4)强烈地震介质破裂与作用力;(5)位场;(6)电磁感应场;(7)壳、幔精细结构;(8)数学模拟;(9)发震断裂与其形成的深层过程.

为促进大陆动力学研究的深入,并从多元视角逼近它,委员会下成立三个学科组,它们在 2011 年单独进行学术活动. 这三个学科组为:

1) 地壳与上地幔探测组,由王椿镛、颜丹平、魏文博负责;

2) 地球形变与动力学组,由谢富仁、吴建平、熊熊负责;

3) 地球内部过程与数值模拟组,由石耀霖、蔡永恩、张健负责.

7 结 语

大陆动力学研究在地球科学领域里越来越显示出它的重要性. 这是因为它不仅涉及了多个学科(地球物理学、固体与流体力学、信息与计算科学、地质学、地球化学等),而且包揽了浅层过程和深层过程,更重要的却是它必须逐步回答或部分地回答有关强烈地震的孕育、发生和发展的深层过程、动力成因和机制问题.

当今摆在大陆动力学面前的地震发展态势是挑战,也展示出应对地球科学深入剖析和研究成效的大好机遇.

愿全体从事中国大陆动力学的研究者,广泛了

解世界上有关大陆动力学研究的进程^[30-33],团结国内外同仁,在大陆动力学研究的征程上刻苦奋进,努力攀登,将理论、方法、观测、实验和应用凝练成一个统一的“链条”,为中国大陆动力学研究的发展和深化认识不断做出新的贡献。

参考文献(References)

- [1] 滕吉文,白武明,张中杰等. 中国大陆动力学研究导向和思考. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 1913-1936.
Teng J W, Bai W M, Zhang Z J, et al. Development direction and ponders of the Continental dynamics in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, 24(6): 1913-1936.
- [2] 滕吉文,杨辉,张雪梅. 中国地球动力学研究的方向和任务. 岩石学报, 2010, 26(11): 3159-3176.
Teng J W, Yang H, Zhang X M. Development direction and task of the geodynamical research in China. *Acta Petrological Sinica* (in Chinese), 2010, 26(11): 3159-3176.
- [3] 滕吉文. 岩石层物理与动力学研究的进展. 地球物理学进展, 1993, 8(3): 45-62.
Teng J W. Advance and developing direction in research of lithospheric physics and dynamics. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1993, 8(3): 45-62.
- [4] 滕吉文,张中杰,白武明等. 岩石圈物理学. 北京: 科学出版社, 2004.
Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, et al. *Physics of Lithosphere* (in Chinese). Beijing: Sciences Press, 2004.
- [5] 滕吉文. 当代中国地球物理学向何处去. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 327-339.
Teng J W. Where are the contemporary Geophysics of China going. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, 21(2): 327-339.
- [6] Zhang P Z, Shne Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the tibetan plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812.
- [7] 许志琴,李廷栋,杨经绥等. 大陆动力学的过去、现在和未来—理论与应用. 岩石学报, 2008, 24(7): 1433-1444.
Xu Z Q, Li T D, Yang J S, et al. Advances and prospectives of continental dynamics: Theory and application. *Acta Petrological Sinica* (in Chinese), 2008, 24(7): 1433-1444.
- [8] 滕吉文. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 317-334.
Teng J W. Deep disscover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(2): 317-334.
- [9] 滕吉文. 强化开展地球内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发. 地质通报, 2006, 25(7): 767-771.
Teng J W. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2006, 25(7): 767-771.
- [10] 滕吉文. 石油地球物理勘探的发展空间与自主创新. 石油物探, 2007, 46(3): 213-225.
Teng J W. Development prospect and independent innovation of petroleum Geophysical prospecting in China. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2007, 46(3): 213-225.
- [11] 滕吉文. 地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境探讨. //第四届海峡两岸地震科技研讨会,暨台湾强地面运动观测研讨会(四)论文集. 台北, 2001: 151-153.
Teng J W. Discussion for the deep medium and tectonic environment of the earthquake pregnancy, generate and development. //Symposium of the 4th Seismological Science and Technology Seminar of the Cross-Strait As Well As Strong Earth Surface in Taiwan (in Chinese). *Taibei*, 2001: 151-153.
- [12] 滕吉文,冯炽芬,李金森等. 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(一). 地球物理学报, 1974, 17(4): 255-272.
Teng J W, Feng Z F, Li J S, et al. Crustal structure of the central part of the North China Plain and the Hsingtai earthquake (I). *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1974, 17(4): 255-272.
- [13] 滕吉文,王国正,刘道洪等. 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(二). 地球物理学报, 1975, 18(3): 196-207.
Teng J W, Wang G Z, Liu D H, et al. Crustal structure of the central part of the North China Plain and the Hsingtai earthquake (II). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1975, 18(3): 196-207.
- [14] 滕吉文,魏斯禹,李金森等. 华北平原邢台地震活动地区的上地幔结构和低速层. 地球物理学报, 1982, 25(1): 58-64.
Teng J W, Wei S Y, Li J S, et al. Structure of the upper mantle and low velocity layer of the mantle under the Hsingtai earthquake region on the North China Plain. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1982, 25(1): 58-64.
- [15] 滕吉文,张中杰,杨顶辉等. 地震波传播理论与地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 1-19.
Teng J W, Zhang Z J, Yang D H, et al. The seismic wave propagation theory and the deep medium and tectonic environment of the earthquake“pregnancy”, generation and development. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, 24(1): 1-19.
- [16] 滕吉文,白登海,杨辉等. 汶川 $M_s 8.0$ 强烈地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1385-1402.
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1385-1402.
- [17] Maruyama S, Santosh M, Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics

- on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 2007, 11(1-2): 7-37.
- [18] 杨辉, 滕吉文, 张雪梅等. 喜马拉雅西构造结及邻区岩石圈演化三维有限元数值模拟. 地球物理学报, 2009, 52(12): 3009-3019.
Yang H, Teng J W, Zhang X M, et al. Numerical simulation on lithospheric evolution of the Himalayan Western Syntaxis with 3-D finite element method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(12): 3009-3019.
- [19] 周光召. 发展学科交叉促进原始创新—纪念 DNA 双螺旋结构发现 50 周年. // 李喜先. 21 世纪 100 个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 2005: 1-V11.
Zhou G Z. Developing Disciplinary Interdisciplinary Science to Promote the Original. // Li X G ed. 100 Interdisciplinary Science Puzzles of the 21st Century (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005: 1-V11.
- [20] 滕吉文, 李惠民, 刘少华. 中国地球物理学会大陆动力学委员会近期学术活动概述. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 754-760, doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.048.
Teng J W, Li H M, Liu S H. Outline report of science activities recently for continental dynamical committee of Chinese Geophysical Society. *Progress in Geophysics*. (in Chinese), 2011, 26(2): 754-760, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.048.
- [21] 滕吉文. 当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 637-640.
Teng J W. The core scientific problems and development direction for the contemporary geophysical research. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(3): 637-640.
- [22] 滕吉文, 张中杰, 王光杰等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆—陆碰撞新模型. 地球物理学报, 1999, 42(4): 481-494.
Teng J W, Zhang Z J, Wang G J, et al. The deep internal dynamical processes and new model of continental-continental collision in Himalayan collision orogenic zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, 42(4): 481-494.
- [23] 滕吉文. 青藏高原地区地壳—上地幔结构与巨厚地壳的形成. 大地构造与成矿学, 1990, 14(4): 333-338.
Teng J W. The structure of crust and upper mantle and formation of huge thick crust in Qinghai-Xizang plateau, China. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 1990, 14(4): 333-338.
- [24] 滕吉文, 闫雅芬, 王光杰等. 大别造山带与郯庐断裂带壳、幔结构和陆内“俯冲”的耦合效应. 地球物理学报, 2006, 49(2): 449-457.
Teng J W, Yan Y F, Wang G J, et al. Structure of Earth's crust and upper mantle, inland subduction and its coupling effects on the Dabie orogenic belt and the Tancheng-Lujiang fault zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 449-457.
- [25] 滕吉文, 胡家富, 张中杰等. 中国西北地区岩石圈瑞利波三维速度结构与沉积盆地. 地球物理学报, 1995, 38(6): 737-749.
Teng J W, Hu J F, Zhang Z J, et al. The 3-D structure of rayleigh wave and sedimentary basins in northwestern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, 38(6): 737-749.
- [26] 滕吉文. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害. 地学前缘, 2001, 8(3): 1-8.
Teng J W. The exchange of substance and energy, different sphere coupling and deep dynamical process within the earth. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2001, 8(3): 1-8.
- [27] 滕吉文. 地球深部物质与能量交换的动力过程与矿产资源的形成. 大地构造与成矿学, 2003, 27(1): 3-21.
Teng J W. Dynamic Process of Substance and Energy Exchanges in Depths of the Earth and Formation of Mineral Resources. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2003, 27(1): 3-21.
- [28] 滕吉文. 地球深部物质与能量交换和动力过程. // 21 世纪 100 个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 2005: 327-344.
Teng J W. The exchange of substance and energy and dynamical process in the earth interior. // The 100 Crossing-Subject Problems in 21st Century (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005: 327-344.
- [29] 滕吉文. 20 世纪地球物理学的重要成就和 21 世纪的发展前沿. 地学前缘, 2003, 10(1): 117-140.
Teng J W. Great Achievements in Geophysics in the 20th Century and developing frontiers for the 21st century. *Earth Sciences Frontiers* (in Chinese), 2003, 10(1): 117-140.
- [30] Kanamori H. Earthquake Seismology: Treatise on geophysics (volume 4). Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [31] Bercovici D. Mantle dynamics; Treatise on geophysics (volume 7). Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [32] Olsen P. Core dynamics; Treatise on geophysics (volume 8). Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [33] Windley B F, Yuen D A, Maruyama S, et al. Superplumes: Beyond Plate Tectonics. New York: Springer, 2007.

(本文编辑 刘少华)