

滕吉文. 地球物理学及地球动力学研究与计算数学. 地球物理学进展, 2010, 25(1): 343~358, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 01. 046.

Teng J W. Geophysics and geodynamics related to computational mathematics. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25 (1): 343~358, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 01. 046.

地球物理学及地球动力学研究与计算数学

滕吉文

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要 地球物理学是 20 世纪, 特别是在其中叶以后迅速发展起来的一门边缘科学. 它以物理学、数学和信息科学为依托, 并与地质学、地球化学密切结合; 以研究和探索地球内部介质的属性、结构变异和深部物质与能量的交换、深层过程和动力学响应. 这在促进社会与经济和科学技术的进步中占有重要地位, 因为大量资源的需求和自然灾害的防范在人类生活和生存空间以及可持续发展中乃核心所在. 在研究和探索这一系列的地球科学问题的进程中, 首先必须通过地表进行高精度的地球物理探测、观测和高分辨率的数据采集, 进而利用不同的数学方法反演计算地球内部介质的精细结构及其物理—力学过程与动力学响应. 基于此, 本文主要讨论了: 1) 地球物理学和地球动力学的发展趋势及特点; 2) 地球物理学的发展对计算数学的需求; 3) 地球动力学和数值模拟与计算地球物理学. 最后对这些问题和基本导向进行了讨论.

关键词 地球物理学, 计算地球物理学, 地球内部的圈层耦合、物质与能量的交换, 地球动力学

DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 01. 046 中图分类号 P3 文献标识码 A

Geophysics and geodynamics related to computational mathematics

TENG Ji-wen

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract Geophysics is a subject developed from the 20th century. It is based on physics, mathematics and information sciences, and combined with geology, geochemistry closely. Aimed at probing and studying the property and structure of earth interior media, exchange of substance and energy and deep process and dynamic response, it plays an important part in accelerating the development of our society economy, science and technology. Preventing of natural disaster and needs for natural resource are the core issues in the sustainable development of human being. In research and exploration of these geosciences problems, we must firstly acquire data with high resolution, and then invert the fine structure of the earth interiors and its mechanical process and dynamical response. This article discusses the development tendency and characters of geophysics and geodynamics, development of geophysics and its need for computational mathematics, mathematic simulation in geodynamics and computational geophysics.

Keywords geophysics, computational geophysics, layer coupling in earth interior, exchange of substance and energy, geodynamics

0 引 言

地球物理学是 20 世纪, 特别是其中叶以来才迅速发展起来的一门重要边缘学科, 它以物理学、数学

和信息科学为依托, 并与地质学及地球化学密切结合以研究和探索地球内部的介质结构、属性和深部物质与能量的交换、深层过程和动力学响应^[1~3]. 它是认识行星地球形成、演化以及人类自身生存和发展休戚相关与可持续发展的一门自然科学, 是人类

社会发展的支柱性、基础性科学,即与人类社会的发展、进步息息相关。

21 世纪初,地球物理学在经历了以活动论为内涵的板块构造和行星际探测双重革命的重大发展时期以后,现在正处在一个新的起点上. 从全球地球科学的发展趋势来看,它的未来面临着比以往任何时候都更富有挑战性的复杂格局,同时也正处在一个充满希望与前景的转折点上,展现出前所未有的发现和突破机会. 为此,世界上很多国家都把本世纪上、中叶看作全球地球物理学发展的关键阶段,并提出了许多前沿研究领域. 随着研究的深化,不仅会出现许多新的成果,而且必然会形成一些新的科学思维、理论、方法和概念^[4~6].

地球科学的最终目标是了解地球本体和其他行星从太阳系中诞生到它的目前状态的演化,以便能对行星的物理学、化学、地质学和生物学的作用过程建立起详细的、定量的概念性预测模式,即要力求建立行星地球的整体理论.

因此计算地球物理学在地球科学中乃是人类用以深化认识地球的重要途径之一. 计算地球物理学必须以物理学的发展为内涵,以当代先进的数字方法和成就为依托,探索地球内部的精细结构、形成机制和动力体系及演化. 它的研究范围涉及地壳、地幔和地核,尤其是岩石圈和软流层发生的各种物理现象、成因及其深层动力过程. 这就需要通过地球物理场的观测、数据采集、资料处理和正、反演计算,并以地球作为整体进行综合研究,为成山、成盆、成岩、成矿、成灾和成核提供力源机制,以达到深化认识地球本体、并造福于人类的目的.

在整个人类历史的进程中,都在探索地球的起源、发展和活动,人们在承认地球是为维系人类生存提供一切物质源泉后,才真正认识到了了解地球和提高生产、生活水平之间有着内在的关系. 对于地球这样一个极为复杂的物理、化学和生物体系的探索,必须吸收当代最先进的科学方法、技术和训练有素的高造诣的人才方能奏效. 地球物理学与动力学至今已积累了大量的深部资料,得到了不少新认识、新概念和新理论,更重要的却是提出了一系列的新问题. 因此动摇了一些传统观念,触及了一些人们以前尚不敢触及的问题和领域,并沿着新的方向迅速发展. 这些问题的研究和深化、量化则必须得到计算数学的支撑方能建立起逼近的模型. 这是因为社会发展与进步的巨大需求,人类探索自然的强烈兴致,世界高新科技的进步乃是其发展和创新的驱动力.

最近参加了一系列的有关地球物理学和地球动力学研究方面的会议,包括金属矿产资源地球物理;油、气、煤能源地球物理;地震活动与灾害地球物理;地球内部物理学与地球动力学等. 为此也迫使自己读了一些有关方面的文献和书籍. 纵观这些会议内容和书刊的有关论述,提出了三个问题:第一,发现在这些工作中都进行了或进行着数值计算和模拟方面的工作,特别是正、反演计算. 然而这一系列的数值计算与模拟工作基本上均尚为定性的或轮廓性的参考,或是“马后炮”的计算与模拟;第二,发现有不少迫切希望能得到计算地球物理学涉足的课题,以求得更为逼近的解答,如地震波在复杂介质与结构中传播的波动方程正、反演和参量求取及验证,且急需较快地从声波波动方程转化到以弹性波波动方程的正、反演计算;第三,在研究地球物理场和深层动力过程中,多要素约束下初始模型的提取,特别是比较逼近的边界条件乃是十分关键的,但却往往存在任意性较强与尚较局限. 本文针对这三方面的问题,并在多人大量工作的基础上,仅谈谈自己的初步认识,也讨论一下计算数学在地球物理研究中的需求和导向. 我想强调的是,这仅仅是在众多科技研究成果启迪下的思考!

基于上述考虑,将讨论五个方面的问题:

- (1)地球物理学领域里地球动力学的发展势态和基本特点.
- (2)地球物理学的发展进程与对计算数学的需要.
- (3)大陆动力学与计算地球物理学.
- (4)地球动力学数值模拟的基本任务.
- (5)讨论和结论.

1 地球物理学领域中地球动力学发展的势态和基本特征

我们常说“地球奇观,千姿百态,引人入胜”,一点也不夸张. 人们在地球表面所见到的山岭起伏,河流纵横、苍海桑田以及各种地球物理、地球化学和地质现象,它们的规模是如此之大,延续的时间又是如此之长,它们不可能是地表或浅表层过程所致,而必然要归结到地球深部物质与能量的交换和其动力学响应.

1.1 趋势

近年来有关地球动力学的研究计划已从全球性逐转入到大区域性、乃至局部地带的研究,以使在更深层次上去探索物质运移的力源机制,以求得从特殊到一般的规律性认识.

1989 年美国钱德勒会议后,由报告委员会发表了《美国 30 年(即到 2020 年)大陆动力学研究国家计划》^[7,8],这一具有导向性的研究计划在国际上产生了重要反响.该计划提出的在大陆动力学领域里具有挑战性的基本科学问题有:大陆的成因和演化、下地幔与地壳的耦合;地震与板块边界的相互作用;大陆地壳中的岩浆成因和动力学;大陆岩石圈的变形与活动性;大型沉积盆地的成因和演化;地壳—水圈相互作用和作为气候和在全球研究中地球系统的历史等^[9,10].

这一以研究大陆壳、幔组成、运动行为、动态演化和驱动力系以及为发展板块构造理论为目的、服务于人类需求的战略计划提出后,世界上有许多国家和有关的国际组织及机构均给予了极大的关注.当今世界上已有不少国家先后制定和出台了具有区域性特色的各种大陆动力学计划,如欧洲的地学大断面计划(EGT),法国的 ECORE 计划,英国的 BIRPS 计划,意大利的国家计划,加拿大岩石圈探测计划(Lithoprobe),国际岩石圈十年计划,国际地学大断面计划(GGT)等等;2004 年美国提出并开始执行《地球透镜计划》(Earthscope);2000 年澳大利亚提出了“玻璃地球”计划(Earth Clasess)^[7],近来又提出了进一步深化研究的计划等.在国际岩石圈委员会提出的新计划中,包括了地球增生系统、火山活动与预报、岩石圈与软流圈的相互作用、大陆地壳超深俯冲、中欧年轻地幔柱以及地壳应力与应变的时间和空间变化等十大研究内容,并将大陆地形四维变化研究称之为综合固体地球科学的新前沿^[8].欧洲也提出一个包括有四大科学问题在内的欧洲岩石圈研究计划^[11],这些计划的规模都十分宏伟,且都是围绕着解决本国所在大陆的或是从全球角度出发、即具有重大科学意义的岩石圈与动力学研究.这些研究与进程取得了丰富的成果,深化了人们对许多重大地质事件的认识,成绩斐然.显然,这项研究与过去传统的单一学科性的研究方式完全不同,它是多学科的综合与交叉,形成了继板块构造学说提出之后当代地球科学发展的一个新阶段^[10].

随着地球动力学研究的深入,在较小尺度下,局部构造环境中的地球动力学问题已经逐渐成为研究的热点.当今地球动力学在地球内部壳、幔精细结构和深层动力作用过程的基础上,在几个重要方面应给予关注,即板块俯冲带岩石圈的脱水和岩浆活动;岩石的相变和深源地震的成因;水和流体在地幔中赋存形式和对地幔物质运动的影响;地幔转换带的

物质结构和物理性质;核幔耦合及 D'' 层的结构;地幔柱、热点结构和动力学;地幔对流过程中物质的混溶和分异^[1~3,12~14]等.

国家战略需求和自主创新乃当务之急,而强化观测、实验、分析、计算于一体已越来越成为地球物理学发展的重要推动力,即必须加强基础研究,由定性到半定量,进而向量化迈进!

1.2 基本特征

地球物理学研究的最终目标是深化认识地球本体及其从太阳系中诞生到目前状态的演化,以及对行星的物理学、化学、地质学和生物学的深层作用过程建立起详细的、定量的概念性预测模式,即了解整个地球系统的过去、现在和未来的行为,建立行星地球的基本理论,并利用这种认识为人类生存提供可持续发展的物质和环境.这就是说,在解决人类可持续发展中面临的资源、环境问题已成为发展战略的根本取向,已进入到走向全面研究、探索行星地球和近地空间与生命起源的新阶段;学科交叉与系统集成已成为必由之路^[15].

21 世纪,在地球物理学领域里深化认识圈层耦合、深层动力过程和地球本体已成为成山、成盆、成岩、成矿和成灾研究中的根本轨迹^[16].因此,地球内部精细圈层结构的刻划,耦合效应和地球内部物质与能量交换的深层过程和动力学响应乃是当代地球物理学研究的核心所在^[5,6].

2 地球物理学发展的进程与对计算数学的需求

地球内部是地球物理、地球化学和地质学的综合体系,它们不论在纵向和横向都是不均匀的,各向异性的和非线性的;是在力源作用下物质与能量强烈交换而导致复杂深层过程的体现.这就表明:它们的形成机制是在多元要素制约下的一个复合集成.然而这些介质结构与属性、物质运动的状态与轨迹,力源与机制均必须通过在地表高精度的观测、高分辨率信息的取得,以及通过实验来反演其深部的介质、结构和动力过程,并建立起其全球的、大区域的以及局部地区的运动学和动力学模型.为此,在地球物理学研究的正、反演计算中,不论是一维、二维、三维或四维均必须借助于当今数学已有成就的基点上,并有机的应用于地球物理学领域,方可求得逼近的解答,进而建立起概念性的基本模型.

2.1 反演理论、方法和算法的研究

数学物理方法研究偏微分方程的初边值问题,

描述物理现象的作用过程,属于“正问题”。“反问题”系指观测到的物理现象与作用过程所采集的某些数据,以用来推算偏微分方程的初边值条件或系数项^[19].为此以地球物理反演来研究波动方程或泊松方程的反问题,这些方程的边界条件及系数项则表征着和反映出地球介质与结构的不均匀性.基于反演(逆)算子的构成、性质和用于计算时的稳健性在促进地球物理学的发展中有着重要作用.在地球物理各个学科中,包括地震、重力、磁法、电磁法等分支学科,每一个方法都有自己的一套数据处理、反演和解释方法.所以在地球物理反演的理论中必竟要注意到:

(1)统一性.即在泛函分析的基础上建立对各种地球物理方法都适用的广义线性反演理论与算法,包括地震道广义线性反演、位场数据广义线性反演、以及应用于多种不同类型数据作输入的联合反演方法等.

(2)适应性.以前人对地球物理反问题主要采用微扰法,即假设地球介质的不均匀性属于小扰动或水平成层.针对地壳物质的高度不均匀性,则必须有适用于大扰动和非水平层状介质中声波方程反演与地震波速成像方法和跨孔地震层析成像方法.

(3)非线性.从混沌理论出发,探索非线性地震反演的规律性,证实非线性迭代过程可与非线性动力系统的混沌运动作类比发现,非线性地震反演过程的混沌行为可以划分为类似于相变的几个阶段.同时,应用混沌理论可科学地定义非线性地震反演的控制参数,以提高地震反演的分辨率^[19].

在地球物理学的正、反演研究中,早期是基于几何学的框架进行正、反演的计算;后在各向同性、无限均匀和完全弹性的假设下,并依据声波波动方程进行正、反演计算;后又发展到粘弹性介质以及双相介质等的正、反演计算,但仍基本上是建立在声波波动方程的基础上^[17~28].然而实际介质则是各向异性的、不均匀的和非完全弹性的,这当必就限制了反演所得结果对地下介质与结构真实性认识的逼近.

2.1.1 地震波动理论研究

基于地球壳、幔深处实际介质对地震波能量是存在不同程度的吸收和扩散效应,即存在着不均匀性、各向异性和非线性特征.这就必须研究基于声波方程在多相介质中波的传播,非均匀介质中的传播,各向异性介质中的传播和非线性介质中的传播;而更重要的则为研究基于弹性波波动方程与多相介质中地震波的传播,非均匀介质中地震波的传播,各向

异性介质中的传播,非线性介质中地震波的传播等.

2.1.2 非均匀介质中地震波动数值模拟

当今三维弹性波数值模拟需要占用庞大的计算资源,二维又不能准确的近似三维模拟.为此有不少人在进行 2.5 维的研究^[29~41],并试图逼近于三维数值模拟.这便表明,在地震波场数值模拟中,算法研究尚有待新的理论、方法和快速运算程序的提出.

2.1.3 强烈地震“孕育”与发生的动力学响应

关于强烈地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境与深层动力过程的正、反演计算;震源区介质在力源作用下“微破裂”的形成^[42]和应力不断积累与“破裂链”的形成及其机制,以及利用观测资料预测震源区的应力变化等.

1999 年 8 月 17 日土耳其的伊米特地区发生了强烈地震,计算了该强烈地震震前几十年内地震产生的库仑破裂应力变化得出,这里是库仑破裂应力变化较大,并指出这里应为地震危险性较高的地区,引起了地震学界的重视^[42~48].由于应力变化对地震波速度、能量衰减的响应,并对强烈地震的“孕育”、发生和发展有着激励效应.显然,随着数字观测台网的广为建立和数字地震观测仪器性能的不断提高,利用地震观测资料进行震源区应力变化和破裂过程的研究已成为国际间地震学界的研究热点^[45].

2.1.4 逼近和最优化反演与算法及速度

在地球物理的正、反演计算中不同维数的计算不论是边界条件、算法和计算速度上是存在重大差异的.因此在多要素约束下初始模型的提取,不同的数学计算方法(如 Green 函数、有限单元、边界元、谱光法、矩阵法等)和收敛速度对地球物理问题的解答(解析解和数值解),如最优化和逼近以及计算速度乃是十分重要的^[49~82].

2.1.5 软件编制和计算平台

在地球物理学的应用软件方面至今基本上还是“进口”,即对国外已有软件模块的强行应用或略加修补.因此不论在石油和金属矿产资源的勘探中,还是地球内部与地球动力学研究中尚十分缺乏自主研发的系统软件或模块.这当必定要限制这一领域的提高,特别是限定了对我国一些实际问题的深化认识.

例 1,自 20 世纪 70 年代以来,在石油地震勘探中所应用的软件均为来自美、法的模块^[83~92],这些模块买进后并没有深入分析和研究,只是局部的应用,更谈不上完全消化和开发.然而人们必须看到的是国外在油、气田地区,不论是构造和岩性相对而言

都是比较“简单的”,远不及中国复杂.因此这些系统软件和各类数字模型的应用必会限制对我国复杂构造和岩性的认识和解释,难以取得逼近的效应.就这样还要受到西方石油公司有关软件系统的限定.因此中石油东方地球物理公司必须发展自己的软件系统,如今已提出了 Geoeast 软件系统.

例 2,在石油地震勘探的偏移成像中,长期以来全面采用着国外已有的偏移程序^[88,89],即基于声波方程的叠后深度偏移,多年来应用效果是各异的,不甚理想.近年来国外又推出了叠前深度偏移,我们又蜂拥而上,数据处理效果得到不少改进,然而对我国的实际情况来说却存在不少局限.因此,如何给出双程走时波动方程叠前时间和深度偏移,得出高分辨率的成像系统,并建立起全方位无缝隙分析平台乃当务之急.

例 3,在地球内部,特别是壳、幔三维速度结构(地震层析)成像研究中,当今我国几乎单色的引入国外基于声波方程的计算软件程序^[93].但这一软件是适宜于在大区域内和在略弯曲平界面条件下的反演,而怎样适宜于中国的区域性研究和起伏地表与深部壳、幔界面强烈变异以及深大断裂和板内动力边界的条件则还有不少问题有待深化.

以上三个实例表明:我国地球物理学的进程必须依靠计算数学的有效应用,并基于我国的实际,从观测和实验中提取适宜的介质结构与属性的物理参量,应在当今已有的数学理论、方法和信息技术的基础上,同时参考和消化“进口”软件,形成自主的软件系统和软件库.为适应国家需求,并独立于世界地球科学之林,则必须组构一个长期稳定的反演与计算方法和软件系统的研究和应用平台.

2.2 亟待开发的软件系统

(1)地震波的传播

基于声波波动方程:地震波在非均匀、各向异性和非线性介质中(包括多相介质)地震波传播的波动方程和应用软件.

基于弹性波波动方程:地震波在非均匀、各向异性和非线性介质中(包括多相介质)地震波传播的波动方程、并逐步提出应用软件.

(2)基于弹性波波动方程的地震偏移:叠前时间和深度偏移以及叠前与叠后偏移的联合应用.

(3)基于弹性波波动方程反演的小区域及局部地域弯曲界面、并含断裂构造的三维速度结构成像软件系统.

(4)基于弹性波波动方程;反演和精细速度结构

刻划与运动学参数计算,主要包括:平均速度、层速度、视速度、速度比、泊松比等.

(5)基于弹性波波动方程;反演的动力学参数,主要包括地震波能量的衰减(α 和 Q)、扩散(n),频谱($s(\omega)$),偏振与极性.

3 大陆动力学与计算地球物理学

3.1 发展现状

当今在自然科学领域里,乃至生态环境及农业和林业中高性能数值模拟技术,已经成为继理论分析和科学实验之外人类认识自然不可或缺的手段之一.在核武器研究中,美国可以用模拟计算代替真实实验,从而迫使签署核禁试条约以保持自己的垄断地位.在气象预报中,数值预报已经在全球数十个国家内成为常规预报的主要手段.在生态环境和林业及农业中数值模拟评估产量和环境变迁已逐成为重要的途径之一.

(1)在固体地球科学和地球动力学研究中,具量化和逼近的数值模拟研究还相对薄弱.当然这与很多因素有关,例如深部介质和结构精细参数的提供,深部物质与能量交换的理念和物理—力学参量的不准确或不够准确,约束条件理想化和粗糙的初始模型,始条件边界条件建立的想当然以及一些介质属性参量的人为给定等等,故使得数值模拟结果仅具参考意义或为事后“诸葛亮”.正因为如此,它才更具有巨大的发展潜力、孕育着重大的突破和可能性.通过各种先进科技手段的高分辨率人工源深部地震探测和地表高精度天然地震的长周期观测,佐以多尺度超大规模并行数值模拟技术,是揭示大陆演化奥秘,以获取资源、能源、地震灾害等科学问题的深刻认识乃是世界发达国家地球科学研究中的前缘之一.例如,曾经蝉联世界超级计算机之首三年的日本地球模拟器(Earth Simulator),就是为解决地球科学问题而建造.通过合理的理论建模和准确恰当的约束输入,以解决大陆动力学的核心科学问题,并提供以较经济的方式模拟和分析区域壳幔演化过程与成矿关系、认识地壳应力场演变规律和预测地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境及其物理—力学过程,确是世界各发达国家地球物理学中的重要研究目标^①.

① 石耀林.岩石圈三维结构与动力学数值模拟项目实施方案. 2008 年 9 月.

(2)国际上关于地球动力学模拟的研究,在层次上涉及地球整体和地球的不同圈层,涉及不同的空间尺度和时间尺度。近年来取得突出进展的领域包括:地核发电机模拟计算以解释地磁场的起源和反转、变化,地幔对流的计算以解释全球板块构造运动的一些力源机制及重大基础问题,岩石圈动力学计算模拟以解释世界上大规模地质构造过程的形成和演化机理,计算模拟地壳应力场形成和演变的控制因素,以及地震的“孕育”和发生与发展的深层过程及其动力学响应等。对我国的一些典型的区域性动力学问题,国际上和我国的学者也均给予了极大的关注;例如青藏高原地球动力学演化的模拟(如地壳短缩增厚、整体隆升、陆—陆碰撞及侧向流展)、华北克拉通破坏和演化的模拟(如破坏的深层过程、轨迹和力源机制,克拉通的边界场效应和盆、山耦合)、大别山苏鲁超高压变质带物质与能量的交换及其形成的机理和模拟等。

(3)地球内部精细结构乃地球动力学研究的基础。在深层动力过程这一科学问题的认识和探索中,首先必须进行高精度的地球物理探测和观测以及实验室内的模拟与实验,并与地质学、地震学、高分辨率长周期卫星观测等多种高新技术集成起来进行综合分析。为此,我国在近几年来相继启动了“华北克拉通破坏”,“中国大陆深部探测技术集成与实验”,汶川地震断裂带科学钻探工程和喜马拉雅计划等重大研究计划。这些重大研究计划的顺利开展和实施,特别是精细地球物理深部探测的高新技术、数据处理与成像技术、以及地球物理与地质构造耦合及互动解释技术的迅速发展,为我国开展建立在超大规模并行机计算基础上的中国大陆深部地幔对流与地球内部圈、层耦合关系的精细数值模拟及实验的数值分析提供了极为重要的基础。

同时,近年来的岩石物理性质的测量技术和实验仪器的进步,使得我们有条件对于岩石的物理力学属性,特别是岩石的流变学性质等,进行深入的实验研究和测试分析,从而可以给出较可靠的覆盖中国典型构造域的物性结构剖面,进而为大型数值模拟提供必不可少的本构关系参数。

时、空多尺度与耦合响应乃是中国大陆壳、幔相互作用与演化过程的典型特征。因此,解决这些基本的科学问题,而以传统理想抽象的简单模式,粗略分析已经不能适应目前开展相关领域科学研究的合理需求。这就必须是通过严谨的计算数学建模,并以超大规模并行数值模拟技术为最基本的研究分析手

段,开展数值模拟试验,厘定大陆深部地幔对流与岩石圈耦合关系的多种地球动力学演化模式,量化研究中国大陆壳、幔相互作用的各种边界条件、物理—力学过程和各个圈层的耦合效应、理解深部物质与能量的交换及了解壳、幔耦合的动力学过程及其基本特征,以识别决定性因素和关键性控制参数,方能给出合理的、量化的地球的深层过程及动力学响应的解释。

(4)动力学模型与模拟。在地球动力学模型基础上建立超大型并行数值模拟平台系统。这一平台系统可从空间多尺度的视野,分析不同对流模型轨迹的下边界和横(侧)向边界条件对复杂介质属性及岩石圈变形基本物理过程的制约机制。研究局部地区变形、温度与空隙流体运移的耦合和相变的物理基础,研究和探索我国大陆壳、幔演化与成矿作用的基本规律;也可以从时间多尺度角度探求深层地幔物质的运动过程,如华北克拉通破坏;与龙门山造山带地域地壳应力场分布;与深部壳、幔结构及其深层过程的物理本质关系;与构造应力场变化及历史大地震序列之间的主要关系等科学问题。显然,这些问题的研究若仅依靠以往借助于简单的力学和数学模型是无法解决的,也难以有助于对实际观测结果的解释。

3.2 需求概况

岩石圈是地球外层的固体部分,它漂曳在上地幔软流层之上,且因岩石圈中壳、幔介质的物理属性(如密度、地震波速度、电阻率等等)差异又划分为若干层、圈。基于板块构造的消减、俯冲、碰撞、深部物质与能量的交换,故逐使地幔物质运移和上涌,岩浆活动、火山喷发、地震“孕育”等一系列的、且又极为复杂的深层动力过程^[20~76]。这是由于:地球动力学乃是地球物理学与力学相结合而又必须以计算数学为手段,即三者相互制约与耦合的跨学科研究分支。它是基于地球整体运动,地球内部和表层的介质属性和构造运动特征来探讨其动力学演化的物理—力学过程,进而寻求它们的驱动力系作用和机制。因此它的内含乃是从力学分析的角度出发去探讨地球各圈层的耦合响应和物质运动的轨迹。上世纪70年代初板块学说的建立和兴起,以及GPS为主的大地测量技术的日臻完善,世界各国和中国大陆地壳运动观测网络的建立,全球数字化台网的实施,深海钻探计划,大陆地学断面计划等多学科的联合研究已经取得了重要的新认识。但是,在确定作用于板块上的力系以及板块内部力学响应的动力学研究却仍存在不少问题。因此,基于大型并行计算的现代数值模拟

技术和相关的岩性参数测定与流变学性质的研究,当必会有助于人们从运动学行为进入到动力学阶段,以达深化认识地球介质与结构的本体。

(1)大陆岩石圈介质的流变学属性和结构是进行大陆深层动力学过程模拟计算的必要前提,而地下温度分布将强烈的影响着岩石介质的流变性质。因此,把野外数据和实验室数据结合起来,建立三维岩石圈温度分布模型,进而建立区域的岩石圈结构和流变模型,特别将是结构、变形、热传递等物理作用含盖计算程序,对于逼近的认识深部物质运移的客观规律,探索其地球动力学响应十分重要。

(2)区域性动力学过程与计算地球物理学。我国有着世界上独特的青藏高原、秦岭—大别超高压变质带、华北克拉通破坏、川滇活动构造带和强烈地震频频发生等多样化的地球科学环境,存在世界上板内地震最强烈的地带(特别是川、滇活动构造带),且强烈地震频频发生,如 2003 年昆仑山西口 8.1 级大地震,2008 年汶川—映秀 8.0 级大地震等。在东亚多元板块作用下,使中国大陆组成为一个破碎镶嵌的块体,而南海海盆的下沉和青藏高原的隆升这一高一低乃是中、新生代以来我国、乃至东亚最为壮观的地球科学事件。为此印度洋板块与欧亚板块的陆—陆碰撞,太平洋板块的西向俯冲,青藏高原的整体隆升、南北地震带的形成和华北克拉通破坏的动力学响应等表征着中国大陆最为重要的深层动力学过程,它们不仅影响着现今中国大陆的构造格局,而更为重要的却是制约着地球深部物质与能量的交换,深层动力过程与我国矿产资源和地震灾害的分布与策源地。

(3)地球内核自转与动力学响应。地球固体内核(SIC)和地球其余部分之间的引力和压力的相互作用引起了一个力矩,从而对地球的章动运动产生影响。由于 SIC 的转动惯量和整体地球转动惯量相比非常小,因此可以认为 SIC 的动力学效应只是导致一个新的章动本征模,其频率与自由核章动(FCN)相差不太远,且对地球章动产生了一个微弱的共振影响。这便必然要涉及对内核地球自转动力学理论和引潮力位的复数球函数表示的基本理论研究。这就需要建立对流体外核(FOC)、固体内核和整体地球的转动惯量、张量和角动量的表达式,并要建立液核自转的动力学方程和内核自转的动力学方程等^[94,95]。

另外,核—幔边界与 D"层做为地球内部的热动力边界层,而其热物质的运移以及其与地幔冷柱、地

幔热柱的内在联系及响应等均为建立在多要素约束下一系列本构关系的建立和深部物质与能量的交换。

3.3 数值模拟参量选取中存在的问题和可靠途径

(1)物理参数的不确定性。基于利用地球物理、大地测量和大地构造等观测资料建立二维与三维空间几何模型后,数值模拟能否获取逼近于实际的结果,首先取决于所选用于计算的物理参数的合理性(包括可靠信息与信息量)。利用实测的地球物理数据以及壳、幔介质的流变学观测数据(包括实测资料反演求得的 Q 值和实验室岩石物性测定),并结合岩石圈流变学分层理论,计算求解其弹性参数(如密度、体积模量、剪切模量、杨氏模量、泊松比和拉梅常数等)和强度参数(如抗张强度、粘滞系数、内聚力、摩擦角和膨胀角等)将有可能获取比较合理的模拟参数^[77]。

基于人工源深部地震探测(包括近垂直反射,宽角反射和折射波场)和通过反演求得的地壳、上地幔的分层速度结构(P 波和 S 波速度)可以给出基本的弹性参数。然而怎样求得深部壳、幔较为可靠的介质密度尚十分艰难,为此只有使用经验公式或由速度结构按线性关系换算出密度,当然这与实际介质的密度是有较大差异的;最后只有根据速度和密度来确定弹性参数。

有关强度的参数多依据于地震波传播的速度值、稀少的 Q 值结果(求值粗糙)^[55]、并结合高温高压实验测试的结果定性的推断地壳岩石强度随深度的变化趋势,故在地球动力学数值模拟中有关强度参数的确定尚存在着较强的人为因素,很难逼近于复杂壳、幔介质本体的属性。

尽管地球动力学数值模拟在地球物理学研究中已取得了一些重要进展,但由于模型参数的确定还缺乏可靠的定量依据,故其结果当必会导致人们的怀疑和争议。

(2)粘滞系数的选定

地壳和上地幔的介质在短时间的力系作用下(如地震波动过程)主要表现为弹性性质,即符合虎克定律,若介质在力系的长时间作用下(如构造运动,地震“孕育”和板块的挤压或碰撞等)则表现为非弹性的,即不符合虎克定律。对于与地壳形变有关的这种非弹性性质可用粘滞系数来表征,而粘滞系数的大小则与介质所受到的温度和压力环境的制约。

目前尚没有很好的办法直接获取地壳深部(大于 10 km)的温度参数,更无法得到地下温度的空间横向变化(宽角反射中的某些震相仅反映了一定岩

石在特定温压条件下的相变,可用来确定特定深度处的温度,大地电磁测深中的电阻率可用来近似地推断温度随深度的变化。尽管由地震波反演求得的 Q 值反映的岩石非弹性与地球动力学研究中的非弹性(粘滞系数)在时间和空间尺度上都有很大的差别,但它们均对岩石所处的温压环境较为敏感。因为可以通过地震波的速度结构与 Q 值结构,并结合大地电磁测深、地热、地球化学资料 and 高温高压实验来近似推断地下不同深度处的温度环境,从而可以使得粘滞系数的选取具有较为可靠的依据。但在实际的数值模拟计算中仍十分困难,其原因有:一为做模拟计算者往往并不仔细的收集,分析、筛选这些参数,以求得比较科学与合理的数值,而往往是比较愿意理想化的抽象,较少考虑多要素约束下的初始模型提取;二为在很多情况下十分缺乏一些比较可靠的物理参量,为此只能大而化之的主观给出参数,或在他人文献中查取与使用(尽管这些文献中的数据也是缺乏实际依据和“拍脑袋”给出的)。据统计关于粘滞系数取用的差异至少是 2~3 个数量级,多者可达 7~8 个数量级或更高,即可由 $10^{-4} \sim 10^{13}$ [96]。

因此在这样的粘滞系数给定下,当必会出现青藏高原的“中、下地壳活动”及隧道流以及众多的有关模型等等[81~87]。显然在利用不可靠的粘滞系数的数学模拟中,其所得结果仅具有参考性,尚颇难对某些动力学问题给出逼近的量化解答。

(3)目前的可能途径。目前已可利用多种方法得到地壳及上地幔顶部的 P 波和 S 波速度结构,如垂直反射、宽角反射、折射、近震体波层析成像、远震体波接收函数、面波频散反演与三维速度结构等。尽管当今已有很多求取 Q 值的方法。但是对于地震波所经介质对能量的吸收,即精确求取 Q 值,特别是介质随深度变化的 Q 值和精确地求取 Q 值,目前对于大多数方法都只能给出一个范围,即尚相当困难。这是因为地震波在介质中传播时对地震波能量的吸收是很复杂的,能量衰减的机制不论是几何的,还是物理的均有待深化,因为对 Q 值的影响因素很多(如频率、粘度、饱和度与压力等)。由于以地震波动为载体,它所携带岩石介质的非弹性信息主要取自地震波特定震相的波形、频谱和振幅,而宽角反射、折射探测中大多数震相(除初至震相外)难以得到比较完全的波形(因均为续至波),而接收函数中不同界面的转换波波形也无法可靠地分离。另一方面,上述两种方法中地震波的射线在近地表都是近似垂直或者说水平传播距离相对尚较短,因为它们对不同深度

的每一特定岩层介质非弹性信息的累积量尚较少,且往往会被波形中的噪声所淹没。因此怎样利用地震高精度观测数据直接求取各层介质的吸收系数及其纵向与横向的变化乃是十分重要的。面波具有完全不同的特性,不同深度的波形可以通过傅氏变换进行分离,使得研究 Q 值随深度的变化成为可能,而面波在一个块体内会传播一段较长的距离,因此会对岩石的 Q 值有较为明显的反映。目前使用面波求取 Q 值的方法较多,主要有双台法、单源-多台法和单源-单台法等。面波方法研究 Q 值的另一个优势在于它对观测系统没有严格的限制,对于研究区上千公里范围内及其周边的地震和台站都可以适用,但其所得结果只能是一个有限的范围,亦难量化。

若能通过不同的地震学方法求得到壳、幔速度结构后,建立起弹性参数模型;通过速度结构、 Q 值结构、地震活动性,并借助于大地电磁、地热、地球化学和地质资料进行综合集成可近似地确定地下温度结构,并将温度结构作为选取粘滞系数的依据;这样有可能在动力学数值模拟中建立比较逼近的地球介质参数模型。

由以上分析可见:虽然各种地震波场探测方法(如人工源地震深部探测,天然地震观测)所得有关速度结构的结果至今还存在着差异、甚至矛盾,当必会给动力学数值模拟的参数选取带来困难,但是人工源地震波场深部探测目前却乃是确定模型物理参数唯一和有效的方法。

总起来看,在计算地球物理学中,特别是对地球动力学的数值模拟中,参量的选取乃十分关键,由于难度很大,故只能停留在定性或参考的意义上。若在物理参数选取这一环节上能够得到相应的突破,则地球动力学的数值模拟计算将必会为地球物理学的研究给出新的认识,并带来新的启迪!

4 动力学数值模拟的基本任务

计算地球物理学在地球动力学数值模拟研究中是在实际地质-地球物理-地球化学和大地测量综合研究基础上,借助于有关数学、物理学的知识,构建并描述岩石圈结构与构造变形及其形成与演化过程的数学-物理模型。以此来探讨该过程中各因素在空间和时间上的演化,进而模拟岩石圈结构与构造变形的动力学机制及其演化过程[78~82]。它必须是定性综合与定量分析的统一,才能适应于地球圈层结构和构造运动的作用过程、时-空背景、复杂边界、以进行量化的研究。它不仅模拟地球内部圈层

耦合、变形特征和物质运移的轨迹,揭示板块、板缘和板内块体运动、俯冲、消减和碰撞的内在规律,而且可以对其以后的地球动力学作用过程进行预测。为此,计算数学乃是地球动力学研究中的核心组成^[97~114]。

(1)基本任务

在地球动力学模拟计算中,应在初步、或基本覆盖我国主要构造单元的典型区域特征参数库的基点上,建立起包含三维计算需要的网络库、三维计算(包括适宜的各种算法,如有限单元、格林函数、有限差分、边界元、射线追踪)和非线性算法,如波形反演、模拟退火、遗传算法,变分波恩迭代算法、谱元法、矩阵法等等、计算程序库应提供有益于对典型的地球动力学问题进行实际计算。为此必须从地球系统科学的角度,高度集成地质、地球物理和地球化学的观测资料,运用数学与物理学中的理论与定量方法和高性能并行计算技术,对中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合演化过程的时空特征与机理进行数值模拟;认识中国大陆深部地幔对流和地幔热柱及地球内部物质与能量的交换及其深层物理—力学过程和不同圈层物质与结构的耦合效应,提升对大陆形成与演化的认识,以达理解第二深度空间成矿的动力机制和地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境及对其深层动力过程的认识^[115~136]。

(2)应予以探索大型动力学体系。地球动力学数值模拟除对一系列算法研究,地球内部与成山、成盆、成岩、成矿和成灾研究外,还必须深化认识地球本体和对行星理论方面的科学问题进行思考、计算和预测,如地球内部物质分异、调整和物质与能量的交换与力源;层、圈耦合的运动学和动力学响应;核—幔边界(含D"层)热动力边界层响应与物质运移;地球的形成和演化及其在太阳系中的作用等进行全新的探索。为人类拥有良好的生活和生存空间与可持续发展做出预测,并为人类服务。

(3)建立中国的数值模拟平台已十分重要。为了研究、探索和厘定以上科学问题,则必须建立起一个功能强大,运行可靠与快速的专门用来模拟地球内部与大陆动力学以及中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合关系的精细数值模拟实验平台。在这一平台的基点上,发展各种线性和非线性算法,结合目前国际上先进的大规模和超大规模数值计算算法,在我国现有研究工作基础上,整合和开发一个三维大型数值模拟平台系统。该系统的数值计算模型将必须专门针对中国大陆深部壳、幔结构,地幔对流与

圈、层耦合关系的精细数值模拟实验;壳—幔—软流层—上地幔结构和物质与能量交换所涉及到的牛顿流体(地幔)与非牛顿流体(地壳)方程、温度场(能量方程)、壳幔热化学演化方程、质量守恒方程等强耦合的核心科学问题。当然,有关中国大陆深部地幔对流与圈层耦合深层过程问题的数值模拟平台是一个系统工程,同时要涉及到众多的学科,如精细壳、幔结构、力学变形、热传递、孔隙流体运动、相变和化学反应等多元的复杂因子。当然还必须思考如何利用现代高性能计算机产出的海量数据,因为人的大脑尚难以直接消化几十万、上百万、上亿量及的数据。因此如何分析和利用已成为一个必须面对的重要课题。

(4)数值模拟面临的问题

①初始条件和边界条件的确定与多参量约束下初始模型提取和动力学方程的建立。

②物理上的合理性和数学上的可行性与简化的数学—物理模型与逼近性。

③参数的迭取、加权和近似度与建模。

④模拟结果的可靠性与可参考性及局限性。

⑤模拟对象或体量的科学思维与途径。

⑥在正、反演计算和解释中的作用。

在这一系列的数值模拟问题中,前者主要取决于不同岩石和物理属性的不确定性度,然而对于深化认识地球本体而言,核心问题是要有思想,并能凝聚创新性的科学问题。

由此可见,这一系有待完善和进一步量化的问题,尚制约着数值模拟的运用和逼近,也制约着人们对地球本体的深化认识。显然这些问题的逼近和取得解答,就必须溶入和运用大量的、乃至十分复杂的计算数学,并且必须与地球物理学密切结合,逐步量化逼近参数的选取,且在多元约束下提取初始模型,建立本构关系,方能取得新的成效。

5 讨论和结语

在地球物理学领域里,没有或缺少计算地球物理的研究和应用是难以取得量化的基本模型和建立起动力学模型^[137]。

5.1 研究导向

(1)弹性波波动理论、反演理论、方法和算法及软件。

(2)资源、能源和灾害是地球动力学研究的主攻方向,特别是第二深度空间(金属矿产资源为500~2000 m深度,油、气能源为5000~10000 m深度)的

找矿勘探.

(3)强烈地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境及其深层动力过程.

(4)盆-山耦合和青藏高原大陆动力学.

5.2 深层过程与动力学机制

(1)深部物质与能量的交换、分异、调整和运移的动力学响应.

(2)地幔对流和核-幔边界动力学.

(3)壳、幔介质的非均匀性和各向异性.

(4)板块漂曳在软流层上的运动学和动力学.

5.3 综合集成与建模

(1)在数据和结果逼近的基础上,针对同一科学问题进行综合分析,以达集成并求得规律性认识.

(2)依据逼近度可分为概念性模型、理论性模型和指导实践的应用性模型.它们的可靠性或可参考性取决于数据的精选,不同参量的有机匹配和针对一定科学问题的理解.

5.4 地球物理学和地球动力学的发展与深化必须多学科交叉和熔融

(1)交叉和熔融与深化认识往往是在本学科发展进程中新生长点呈现的源地,著名物理学家海森伯认为“在人类的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.”1986年,诺贝尔基金会主席在颁奖祝词中说:“从近几年诺贝尔将获得者的人选可明显看到,物理学和化学之间,旧的学术界限已在不同的方面被突破.他们不仅相互交叉,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.”1993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、物理学家克里克和威尔金斯等合作的结果.这就表明,在多学科之间、多理论之间发生相互作用、相互渗透,形成了“科学键”,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、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.迄今,交叉学科的数量已达2000多门之多,其中许多都是交叉科学的前沿^[138],且学科交叉点往往是科学上新的生长点.

(2)交叉学科对地球物理学和地球动力学的发展有着重要意义.为此,在交叉学科的发展中,不能是拼盘,而必须是熔融,不仅要在地球科学内部有机地进行学科交叉,而且还必须拓宽领域,进行大跨度的多学科之间的交叉,不仅要引入当今最新的科技成就,强化应用,而且要吸引、要极力使自然科学界

有关学科领域的研究者涉足到地球物理学和地球动力学研究之中,而计算地球物理学便是在这样的环境下,即地球物理学与计算数学耦合的结晶.这便表明;在地球物理学领域里要入地、下海和上天的同时,必须集数、理、化、天、地、生、和信息科学与高新技术于一体去探索、去发现新的生长点.因此,学科交叉乃是地球物理学和地球动力学研究中的前沿.

这是因为:①将一门科学发展成熟的知识、技术和方法应用到另一学科的前沿,能够产生重大的新成果.因为学科交叉又是创新思想的源泉.显见,物理的分析方法和化学关于分子结合链的知识对建立正确的DNA双螺旋结构起到了重要作用.

②高明的学术权威和领导者,要善于用自身所积累的知识和交叉与熔融的能力及优势,发现学科交叉的切入点,及时开辟新的发展方向.并且要不畏艰险、不怕失败、不怕讥讽与嘲笑,以坚定不移的信念,去奋力实现认定的目标.

③观测和实验是检验理论的唯一标准.因为地球科学是一门直接造福于人类的科学,它必须保持理论、方法以、模拟与观测和实验的密切结合,方能取得重大突破和发现,且为证明理论和方法是否正确的关键所在.

显见,计算数学在地球物理学发展中具有极大潜力,它已发展成为一门独立的分枝,即计算地球物理学.为此它在精确反演和多元量化和成因机制研究或解释中将必会不断起到重要的作用,且会为深化认识地球本体给出新的信息和建立起新的理念!

显然,科学的目的在于认识客观世界,所以科学必然有真理性,因为它必须发现、并揭示客观规律;科学一定是具系统性的和规律性的,所以科学必须是在系统化知识的基点上,不断深化,并求得规律或定理;科学显现出交叉性,各学科知识与方法具有相关性和互补性,所以它的研究对象是有差异的;科学必须是不断发展和创新的,因为它有着无限的潜在空间、而认识却是有限的;不同门类的科学都是统一的,因为自然界本来就是统一的整体;科学必须具有可用性,弗兰西斯·培根说过,知识就是力量!

参 考 文 献 (References):

[1] 滕吉文,张中杰,白武明,等.岩石圈物理学[M].北京:科学出版社,2004.
Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, *et al.* Physics of lithosphere [M]. Beijing, Chinese Sciences Press, 2004.
[2] 滕吉文.固体地球物理学概论[M].北京:地震出版社,2003.
Teng J W. Introduction of Solid Geophysics [M]. Beijing:

- Seismology Press, 2003.
- [3] 滕吉文. 地球内部物质与能量交换和动力学过程. 21 世纪 100 个交叉科学难题[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 327~344.
Teng J W. The exchange of substance and energy and dynamic process in the earth interior. The 100 crossing-subject problems in 21st century[M]. Beijing: Science Press, 2005, 327~344.
 - [4] 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[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 117~140.
Teng J W. Great achievements in Geophysics in the 20th century and devoloping frontiers for the 21st century[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 117~140.
 - [5] 滕吉文. 21 世纪地球物理学的机遇与挑战[A]. 中国科学院 2004 年科学发展报告[C]. 北京: 科学出版社, 2004: 16~22.
Teng J W. The opportunity and challenge of geophysics in the 21st century[A]. The sciences developing reports of Chinese Academy of Sciences in 2004[C]. Beijing: Science Press, 2004, 16~22.
 - [6] 滕吉文. 中国地球物理学研究面临的机遇、发展空间和时代的挑战[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1101~1112.
Teng J W. The developmental opportunity and challenge of Geophysics in the present age in China[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1101~1112.
 - [7] Car G R, *et al.* “玻璃地球”——穿透覆盖层勘查的地球化学前沿[J]. 国土资源情报, 2002, 12: 46~50.
Car G R, *et al.* “Class Earth” the geochemical frontiers prospecting under the overburden[J]. Information of Land and Resourees of China. 2002, 12: 46~50.
 - [8] 严珍珍, 张怀, 杨长春, 石耀霖. 地震激发的地球自由振荡研究综述[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 686~693.
Yan Z Z, Zhang H, Yang C C, Shi Y L. Areview of the Earth 's fee oscillations excited by earthquakes[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 686~693.
 - [9] Report Writing Committel, A National Programs for Research in Continental Dynamics. CD/2020. The IRIS Consorticlm, 1993.
 - [10] 赵文津. 中国大陆动力学研究进展——纪念中国地球物理学会成立 60 周年[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1113~1121.
Zhao W J. Advances in continental dynamics research in China. Commemorating the 60th anniversary of the founding of the Chinese geophysical society [J]. Progress on Geophysics, 2007, 22(4): 1113~1121.
 - [11] 朱涛. 地幔动力学研究进展——地幔对流[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 65~73.
Zhu T. Progress in mantle dynamics-mantle convection[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 65~73.
 - [12] 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[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(11): 1~19.
Teng J W, Zhang Z J, Yang D H, *et al.* The seismic wave propation thory and the deep medium and tectonic enviroment of the earthquake “preguacy” generation and development [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(11): 1~19.
 - [13] 熊熊, 滕吉文, 许厚泽. 地幔热柱动力学研究的新进展[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(1): 62~69.
Xiong X, Teng J W, Hsu Houtse. Progress of study on mantle plume dynamics[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(1): 62~69.
 - [14] 滕吉文. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成[J]. 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 [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(1): 3~21.
 - [15] 滕吉文. 当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向[J]. 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 [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 637~640.
 - [16] Yang D H, Liu E, Zhang Z J. Finite-difference modeling in two-dimension anisotropic media using a flux-corrected transport technique[J]. Geophys J Int, 2002, 148(2): 320~328.
 - [17] Yang D H, Teng J W, Zhang Z J, *et al.* A nearly-analytic method for acoustic and elastic wave equations in anisotropic media[J]. Bulletin of Seismological Society of America. 2003, 93(2): 882~890.
 - [18] Yang D H, Zhang Z J. Poroelastic wave equation including the Biot/Squirt mechanism and the solid/fluid coupling anisotropy[J]. Wave Motion, 2001, 35: 223~245.
 - [19] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1997
Yang Wencai. Theory and Method of Geophysical Conversion [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
 - [20] 滕吉文, 等. 地球内部各圈层介质的地震各向异性与地球动力学[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(1): 7~35.
Teng J W, *et al.* The seismic anisotropy and geodynamics of earth's interior media[J]. Progress in Geophysics, 2000, 15(1): 7~35.
 - [22] 张中杰, 滕吉文, 张霖斌, 等. 各向异性介质中地震波射线满足的改进型斯涅尔定律[J]. 科学通报, 1995, 40(9): 822~825.
Zhang Z J, Teng J W, Zhang L B, *et al.* The improved Snell law associated with the seismic ray in anisotropy media[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(9): 822~825.
 - [23] 张中杰, 滕吉文, 王爱武, 等. 各向异性介质中地震波前面的偏微分方程[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 220~227.
Zhang Z J, Teng J W, Wang A W, *et al.* Partial differential equation of the wave front in anisotropy media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(2): 220~227.
 - [24] 张中杰, 滕吉文, 万志超. 二维各向异性介质中地震波前面参数方程的建立[J]. 科学通报, 1994, 39(15): 1399~1420.
Zhang Z J, Teng J W, Wan Z C. Construction of the wave front equation in the two-dimensional anisotropy media[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(15): 1399~1420.

- [25] 张中杰. 多分量地震资料的各向异性处理与解释方法[M]. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社, 2002.
Zhang Z J. The anisotropy process and interpretation method of multi-component seismic data[M]. Harbin: Heilongjiang education press, 2002.
- [26] 牛滨华, 孙春岩. 地震波动理论研究进展—介质模型与地震波传播[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 255~263.
Niu B H, Sun C Y. Development theory of propagation of seismic waves-medium model and propagation of seismic waves[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 255~263.
- [27] 王秀明, 张海澜, 王东. 利用高阶交错网格有限差分法模拟地震波在非均匀孔隙介质中的传播[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 842~849.
Wang X M, Zhang H L, Wang D. Modeling of seismic wave propagation in heterogeneous poroelastic media using a high order staggered finite-difference method[J]. Chinese J. Geophysics, 2003, 46(6): 842~849.
- [28] 张雪梅, 孙若味, 杨辉, 等. 改进模拟退火算法在研究地壳上地幔层面位置中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1023~1029.
Zhang X M, Sun R M, Yang H, *et al.* Application of improved simulated annealing algorithm in the study of depth of interfaces in the crust and upper mantle[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1023~1029.
- [29] 张中杰, 滕吉文, 杨顶辉. 声波与弹性波场数值模拟中的褶积微分算子法[J]. 地震学报, 1996, 18(1): 63~69.
Zhang Z J, Teng J W, Yang D H. Acoustic and elastic wave modeling by a convolutional differentiator [J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(1): 63~69.
- [30] 戴志阳, 孙建国, 查显杰. 地震波场模拟中的褶积微分算子法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(4): 520~524.
Dai Z Y, Sun J G, Li X J. Seismic wave field modeling with convolutional differentiator algorithm [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(4): 520~524.
- [31] 戴志阳, 孙建国, 查显杰. 地震波混合阶褶积算法模拟[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(2): 111~114.
Dai Z Y, Sun J G, Li X J. Seismic wave modeling with hybrid order convolution differentiator [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 27(2): 111~114.
- [32] 武晔, 李小凡, 顾观文, 等. 2.5 维非均匀介质中的地震波数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1092~1098.
Wu Y, Li X F, Gu G W, *et al.* 2.5D Numerical simulation of seismic wave in inhomogeneous media [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1092~1098.
- [33] 程冰洁, 李小凡. 2.5 维地震波场褶积微分算子法数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1099~1105.
Cheng B J, Li X F. 2.5D modelling of elastic waves using the convolutional differentiator method [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1099~1105.
- [34] John W, Stockwell J. 2.5-D wave equations and high-frequency asymptotics[J]. Geophysics, 1995, 60: 556~562.
- [35] Song Z M, Paul R, Williamson. Frequency-domain acoustic wave modeling and inversion of crosshole data: part I—2.5-D modeling method propagation[J]. Geophysics, 1995, 60: 784~795.
- [36] Takashi F, Hiroshi T. 2.5-D modelling of elastic wave using the pseudospectral method[J]. Geophys. J. Int. 1996, 124: 820~832.
- [37] Cao S, Greenhalgh S. 2.5-D modelin of seismic wave propagation: Boundary condition, stability criterion, and efficiency[J]. Geophysics, 1998, 63: 2082~2090.
- [38] Hiroshi Takenaka, *et al.* Quasi-cylindrical 2.5D wave modeling for large-scale seismic surveys[J]. Geophys. Res. Lett., 2003, 30(21): 2086.
- [39] Stig-Kyrre Foss, Bjorn Ursin. 2.5-D modeling, inversion and angle migration in anisotropic elastic media[J]. Geophysical Prospecting, 2004, 52: 65~84.
- [40] Amélia Novais, Lúcio T. Santos. 2.5D finite-difference solution of the acoustic wave equation[J]. Geophysical Prospecting, 2005, 53: 523~531.
- [41] Sinclair C, Greenhalgh S, Zhou B. 2.5-D Modelling of Elastic Waves in Anisotropic Media using the Spectral-Element Method—a Preliminary Investigation [M]. AESC2006, Melbourne, Australia.
- [42] 滕吉文, 张永谦, 闫雅芬. 强烈地震震源破裂和深层过程与地震短临预测探索[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 428~443.
Teng J W, Zhang Y Q, Yan Y F. Deep process of the rupture of strong earthquakes and exploration for the impending earthquake prediction [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 428~443.
- [43] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. Geophysical Journal International, 1997, 128: 594~604.
- [44] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress coupling between earthquake in the northwest Turkey and the north Aegean Sea[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 24469~24486.
- [45] 郭梦秋, 符力耘. 利用地震观测资料预测震源区应力变化研究进展综述[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 375~383.
Guo M Q, Fu L Y. Review of methods for studying source zone stress changes from seismic data [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 375~383.
- [46] Hubert-Ferrari A, Barka A, Jacques E, *et al.* Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake[J]. Nature, 2000, 404: 269~272.
- [47] Parsons T, Toda S, Stein R S, *et al.* Heightened odds of large earthquake snear Istanbul: an interaction-based probability calculation[J]. Science, 2000, 288: 661~665.
- [48] Bouchon M, Campillo M. Stress field associated with the rupture of the 1992 Landers, California, earthquake and its implications concerning the faults strength at the onset of the earthquake[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 21091~21097.
- [49] 杨文采. 非线性地球物理反演方法: 回顾与展望[J]. 地球物理

- 学进展,2002,17(2):255~261.
- Yang W C. Non-linear Geophysical inversion methods review and perspective[J]. Progress in Geophysics,2002,17(2):255~261.
- [50] 姚振兴,张霖斌.波阻抗反演的混合最优化算法[J].地球物理学进展,1999,14(2):1~6.
- Yao Z X, Zhang L B. Hybrid optimization method for acoustic impedance inversion [J]. Progress in Geophysics, 1999, 14 (2):1~6.
- [51] 王雪秋,孙建国.地震波有限差分数值模拟框架下的起伏地表处理方法综述[J].地球物理学进展,2008,23(1):40~48.
- Wang X Q, Sun J G. The state-of-the-art in numerical modeling including surface topography with finite-difference method[J]. Progress in Geophysics,2008,23(1):40~48.
- [52] 于更新,李东平,符力耘,蒋韬.复杂地质构造的边界元—体积分元波动方程数值模拟[J].石油地球物理勘探,2009,44(1):107~111.
- Yu G X, Li D P, Fu L Y, *et al.* Numeric simulation of boundary element-volume element wave equation in complex structure[J]. Oil Geophysical Prospecting 2009,44(1):107~111.
- [53] 魏荣强,臧绍先.大陆岩石圈流变结构研究进展及存在问题[J].地球物理学进展,2007,122(2):359~364.
- Wei R Q, Zang S X. Progresses and problems in the study of the rheological structure of the continental lithosphere[J]. Progress in Geophysics,2007,122(2):359~364.
- [54] 冯英杰,杨长春,吴萍.地震波有限差分模拟综述[J].地球物理学进展,2007,22(2):487~491.
- Feng Y J, Yang C C, Wu P. The review of the finite-difference elastic wave motion modeling [J]. Progress in Geophysics, 2007,22(2):487~491.
- [55] 郝召兵,秦静欣,伍向阳.地震波品质因子 Q 研究进展综述[J].地球物理学进展,2009,24(2):375~381.
- Hao Z B, Qin J X, Wu X Y. Overview of research on the seismic wave quality factor[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2):375~381.
- [56] 李玉江,陈连旺,叶际阳.数值模拟方法在应力场演化及地震科学中的研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(2):418~431.
- Li Y J, Chen L W, Ye J Y. Application and development of numerical simulation in stress field evolution and seismology [J]. Progress in Geophysics,2009,24(2):418~431.
- [57] 徐小明,史大年,李信富.有限频层析成像方法研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(2):432~438.
- Xu X M, Shi D N, Li X F. Research progress of the finite frequency tomography method[J]. Progress in Geophysics, 2009,24(2):432~478.
- [58] Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, Masters G, Engdahl E R, Hung Shu-huei. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle[J]. Science,2004,303:338~343.
- [59] Montelli R, Nolet G, Masters G, Dahlen F A, Hung Shuhuei. Global P and PP traveltime tomography: rays versus waves[J]. Geophys. J. Int.,2004,158:637~654.
- [60] Baig A, Dahlen F A. Statistics of traveltimes and amplitudes in random media[J]. Geophys. J. Int.,2004,158(1):187~210.
- [61] 何兵寿,张含星,韩令贺,张晶.两种声波方程的叠前逆时深度偏移及比较[J].石油地球物理勘探,2008,43(6):666~684.
- He B S, Zhang H X, Han L H, Zhang J. Prestack reverse time depth migration of two acoustic wave equation and comparison between both[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008,43(6):666~684.
- [62] Liu Q Y, Tromp J. Finite-frequency kernels based upon adjoint methods[J]. Bull. seism. Soc. Am.,2006,96:2383~2397.
- [63] Tape C, Liu Q Y, Tromp J. Finite-frequency tomography using adjoint methods-Methodology and examples using membrane surface waves[J]. Geophys. J. Int.,2007,168 (3):1105~1129.
- [64] Liu Q Y, Tromp J. Finite-frequency sensitivity kernels for global seismic wave propagation based upon adjoint methods [J]. Geophys. J. Int.,2008,174(1):265~286.
- [65] Sieminski A, Liu Q Y, Trampert J, Tromp J. Finite-frequency sensitivity of surface waves to anisotropy based upon adjoint methods[J]. Geophys. J. Int.,2007,168 (3):1153~1174.
- [66] Sieminski A, Liu Q Y, Trampert J, Tromp J. Finite-frequency sensitivity of body waves to anisotropy based upon adjoint methods[J]. Geophys. J. Int.,2007,171(1):368~389.
- [67] Huang S H, Carnero E J, Chao L Y, *et al.* Finite frequency tomography of D" shear velocity heterogeneity beneath the Caribbean[J]. J Geophys Res,2005,110(B):B07305,doi:10.1029/2004 J B003373.
- [68] Chevrot S, Zhao L. Multiscale finite-frequency Rayleigh wave tomography of Kaapvaal Craton[J]. Geophys. J. Int., 2007,169(1):201~215.
- [69] Chevrot S. Finite-frequency vectorial tomography: a new method for high-resolution imaging of upper mantle anisotropy[J]. Geophys. J. Int.,2006,165:641~657.
- [70] Favier N, Chevrot S. Sensitivity kernels for shear wave splitting in transverse isotropic media[J]. Geophys. J. Int., 2003,153(1):213~228.
- [71] Calvet M, Chevrot S. Traveltime sensitivity kernels for PKP phases in the mantle[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,2005,153(1-3):21~31.
- [72] Calvet M, Chevrot S, Souriau A. P-wave propagation in transversely isotropic media I. Finite-frequency theory [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,2006,156:12~20.
- [73] Nolet G, Karato S I, Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters,2006, 148:685~699.
- [74] Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, Masters G. A catalogue

- of deep mantle plumes: new results from finite-frequency tomography[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.* (G3), 2006, 7(11): Q11007, doi: 10.1029/2006GC001248.
- [75] Huang S H, Shen Y, Chao L Y. Imaging seismic velocity structure beneath the Iceland hot spot: a finite frequency approach[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: B08305, doi: 10.1029/2003jb002889.
- [76] Yang T, Shen Y, van der Lee S, Solomon S C, Hung Shu-huei. Upper mantle structure beneath the Azores hotspot from finite-frequency seismic tomography [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 250: 11~26.
- [77] 马昭军, 刘洋. 地震波吸收反演综述[J]. *地球物理学进展*, 2009, 21(4): 1074~1082.
- Ma Z J, Liu Y. A summary of research on seismic attenuation[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 21(4): 1074~1082.
- [78] 马胜利, 马瑾. 我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展[J]. *地震学报*, 2003, 25(5): 528~534.
- Ma S L, Ma J. Recent progress in studies of experimental rock mechanics and tectonophysics in China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, 25(5): 528~534.
- [79] 杨恒, 白武明. 岩石圈流变实验研究的进展[J]. *地球物理学进展*, 2000, 15(2): 79~89.
- Yang H, Bai W M. Progress of experimental study on rheology of lithosphere [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2000, 15(2): 79~89.
- [80] 魏荣强, 臧绍先. 岩石破裂强度的温度和应变率效应及其对岩石圈流变结构的影响[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1730~1737.
- Wei R Q, Zang S X. Effects of temperature and strain rate on the fracture strength of rock and their influences on the rheological structure of the lithosphere [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1730~1737.
- [81] 石耀霖, 朱守彪. 中国大陆震源机制深度变化反映的地壳-地幔流变特征[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 359~365.
- Shi Y L, Zhu S B. Contrast of rheology in the crust and mantle near moho revealed by depth variation of earthquake mechanism in continental China[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(3): 359~365.
- [82] Azra N T, Augusto L P, Alvin R, *et al.* Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part I: Effect of frequency and strain amplitude[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 184~194.
- [83] Claerbout J F. Coarse grid calculation of wave in inhomogeneous media with application to delineations of Complicated seismic structure[J]. *Geophysics*, 1970, 35: 401~418.
- [84] Loewenthal D, Lu L, Roberson R, Sherwood J. The wave equation applied to migration[J]. *Geophys Prosp*, 1976, 24: 380~399.
- [85] French W S. Computer migration of oblique seismic reflection profiles[J]. *Geophysics*, 1975, 40: 961~980.
- [86] Stolt R H. Migration by Fourier transform[J]. *Geophysics*, 1978, 43: 22~48.
- [87] Gazdag J. Wave-equation migration by phase shift [J]. *Geophysics*, 1978, 43: 1342~1351.
- [88] Yilmaz Ö, Claerbout J F. Prestack Partial migration[J]. *Geophysics*, 1980, 45: 1753~1779.
- [89] Ottolini R, Claerbout J F. The Migration of Common midpoint stant stack[J]. *Geophysics*, 1984, 49(3).
- [90] 赵爱华, 张中杰, 王光杰, 等. 非均匀介质中地震波走时与射线路径快速计算技术[J]. *地震学报*, 2000, 22(2): 151~157.
- Zhao A H, Zhang Z J, Wang G J, *et al.* A fast computation method of the travel time and ray traces in heterogeneous medium[J]. *Acta of Seismologica Sinica*, 2000, 22(2): 151~157.
- [91] Zhang J F, Liu T L. P-SV-wave propagation in heterogeneous media: grid method[J]. *Geophys J Int*, 1999, 136(2).
- [92] Zhang J F, Liu T L. Elastic wave modeling in 3D heterogeneous media: 3D grid method[J]. *Geophys J Int*, 150(3): 789~799.
- [93] Tian Y, Zhao D P, Teng J W. Deep structure of southern california[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2007, 165: 93~113.
- [94] 张捍卫, 许厚泽, 王爱生. 内核地球自转动力学理论的研究进展(Ⅳ)——内核自转动力学方程[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4): 1139~1144.
- Zhang H W, Xu H Z, Wang A S. The researchful progress on dynamical theory of Inner core Earth rotation (Ⅳ)——The rotational dynamical equation on inner core of the Earth[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(4): 1139~1144.
- [95] Mathews P M, *et al.* Influence of inner core dynamics theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B5): 8219~8242.
- [96] 孙和平, 崔小明, 徐建桥, 等. 超导重力技术在探讨核幔边界黏性特征中的初步应用[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(3): 637~645.
- Sun H P, Cui X M, Xu J Q, *et al.* Preliminary application of superconductive glarity techique on the investigation of uiscosity at core-mantle houndary [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(3): 637~645.
- [97] Borchfiel B C. New geological logical challenges GSA [J]. *Today*, 2004, 14: 4~9.
- [98] Condie K C. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*, Cambridge Unirersity Precs, 2001.
- [99] Harrision T M. Did the Himalagan Crystallines extrude partially molten from beneath the Tibetas? In: Law R D, Searle M P and codin L (eds). *Channel flows Dutile Extrusion and Exhumation in contineatal Collision zones*[J]. *Geological Society, Condon, Special Publication*, 2006, 268: 237~254.
- [100] Jamieson R A, Beaumont C, Medvodev S, Mguyen M H. Crustal channel flows; 2. Numrioul modes with implications

- for metamorphism in the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109. doi: 10. 1029/2003.
- [101] Jamieson R A, Beaumont C, Mguyen M H, Grujic D. Provenance of the Greater Himalayan sequence and associated rocks: Predictions of channel flow models. In: Law R D, Searle M P and Godin L (eds) [J]. Channel flow Geological Society, London, Special Publications, 2006, 268:165~182.
- [102] Searle M P, Szulc A G. Channel flow and ductile extrusion of the High Himalayan slab-the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalayan [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 25:173~185.
- [103] Williams P F, Jiang D, Lin S. Interpretation of deformation fabrics of infrastructure zone rocks in the context of channel flow and other tectonic models. In: Low R D, Searle M P and Godin L (eds) [J]. Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental collision zones. Geological Society, London Special Publications, 2006, 268:221~235.
- [104] 黄建平, 傅荣珊, 郑勇, 等. 地幔对流拖曳力对中国大陆岩石层变形的影响[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4):1048~1057. Huang J P, Fu R S, Zheng Y, *et al.* The influence of mantle convection to the lithosphere deformation of China mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1048~1057.
- [105] 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊):21~32. Wang M, Shen Z K, Niu Z J, *et al.*, Active geological block model of the recent crust movement of China continent [J]. Science in China (D), 2003, 33(Suppl.):21~32.
- [106] 沈正康, 王敏, 甘卫军, 等. 中国大陆现今构造应变速率场及其动力学成因研究[J]. 地学前缘, 2003, 10(待刊):93~100. Shen Z K, Wang M, Gan W J, *et al.* Contemporay tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (Special):93~100.
- [107] 李延兴, 杨国华, 李智, 等. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊):65~81. Li Y X, Yang G H, Li Z, *et al.* The movements and strain of the active geological blocks in China continent [J]. Science in China (D), 2003, 33(Suppl.):65~81.
- [108] Huang P H, Fu R S. The mantle convection pattern and force source mechanism of recent tectonic movement in China [J]. Phys. Earth. Planet. Inter., 1982, 28: 261~268.
- [109] 傅容珊, 李力刚, 黄建华, 等. 青藏高原隆升过程三阶段模式[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5):610~616. Fu R S, Li L G, Huang J H, *et al.* Three step model of the Qinghai-Xizang Plateau uplift [J]. Chinese J. Geophys., 1999, 42(5):610~616.
- [110] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):415~427. Zheng Y, Fu R S, Xiong X. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas [J]. Chinese J. Geophys., 2006, 49 (2):415~427.
- [111] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D), 2001, 31:529~536. Wang Q, Zhang P Z, Niu Z J, *et al.* Recent movements and deformations of China continent [J]. Science in China (D), 2001, 31:529~536.
- [112] 许忠淮, 石耀霖. 岩石圈结构与大陆动力学[J]. 地震学报, 2003, 25(5):453~464. Xu Z H, Shi Y L. Lithospheric structure and continental geodynamics [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(5): 453~464.
- [113] 陈建业, 杨晓松, 石耀霖. 热-流-固耦合方法模拟岩石圈与软流圈相互作用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4):939~949. Chen J Y, Yang X S, Shi Y L. A coupled thermal-fluid-solid approach for modeling the lithosphere-aestheosphere interactions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (4):939~949.
- [114] 徐文耀, 白春华, 康国发. 地壳磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3):641~651. Xu W Y, Bai C H, Kang G F. Global models of the Earth's crust magnetic anomalies [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3):641~651.
- [115] 滕吉文, 白登海, 杨辉, 等. 汶川 8.0 强烈地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 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 Ms8. 0 earthquake of 2008 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5):1385~1402.
- [116] Darwin C. Journal of researches into the national history and geology of the countries during the voyage of H. M. S beagle round the world under the command of capt. Fitz Roy. R. N. D. Applin and 10. New york. 1998.
- [117] 滕吉文, 张中杰, 白武明, 等. 岩石圈物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, *et al.* Lithospheric physics [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [118] 滕吉文, 杨立强, 姚敬全, 等. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 317~334. Teng J W, Yang L Q, Yao J Q, *et al.* Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2):317~334.
- [119] 滕吉文. 石油地球物理勘探的发展空间与自主创新[J]. 石探, 2007, 3(4):66~72. Teng J W. Development prospect and independent innovation of petroleum geophysical prospecting in China [J]. Geophy Prospecting for Petroleum, 2007, 3(4):66~72.

- [120] 滕吉文. 青藏高原地球物理研究中几个重要问题之我见[J]. 地质前缘, 2006, 13(3): 19~22.
Teng J W. Geophysical research on the Qinghai-Tibetan Plateau and discussion on some related problems[J]. East Science Frontiers, 2006, 13(3): 19~22.
- [121] Teng J W. Some important scientific problems in current lithospheric physics research in China[J]. Applied Geophysics, 2007, 4(1): 66~72.
- [122] 滕吉文. 地球内部各圈层介质和构造的地震各向异性与地球动力学[J]. 地球物理学进展, 2000, 16(1): 1~35.
Teng J W. The seismic anisotropy and geodynamics of earth's interior media[J]. Progress in Geophysics, 2000, 16(1): 1~35.
- [123] 周永胜, 何昌荣. 华北地区壳内低速层与地壳流变的关系及其对强震孕育的影响[J]. 地震地质, 2002, 24(1): 124~131.
Zhou Y S, He C R. The relationship between low velocity layers and rheology of the crust in north China and its effect on strong earthquake [J]. Acta of Seismologica Sinica, 2002, 24(1): 124~131.
- [124] 滕吉文. 地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境的探讨. 第四届海峡两岸地震科技研讨会暨台湾地区强地面运动观测研讨会(四)论文集[C]. 2001, 15~153, 台北.
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 Eechnology Seminar of the cross-stait as cvell as strong earth suface in Taiwan, Taipei[C]. 2001, 151~153.
- [125] 熊熊, 滕吉文. 青藏高原东缘地壳运动与深层过程研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 507~515.
Xiong X, Teng J W. Study on crustal movement and deep process in Eastn Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(4): 507~515.
- [126] 滕吉文, 张中杰, 胡家富, 等. 青藏高原整体隆升与地壳缩短增厚的物理力学机制研究(上)[J]. 高校地质学报, 1996, 2(2): 121~133.
Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, *et al.* Physical-Mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust [J]. Geological Journal of China Universities, 1996, 2(2): 121~133.
- [127] 滕吉文, 张中杰, 胡家富, 等. 青藏高原整体隆升与地壳缩短增厚的物理力学机制研究(下)[J]. 高校地质学报, 1996, 2(3): 307~323.
Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, *et al.* Physical-Mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust [J]. Geological Journal of China Universities, 1996, 2(3): 307~323.
- [128] 滕吉文, 王谦身, 王光杰, 等. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部地壳结构[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1045~1052.
Teng Jiwen, Wang Qianshen, Wang Guangjie, *et al.* Specific gravity field and deep crustal structure of the Himalayan east structural knot [J]. Chinese Journal Gaphysics, 2006, 49(4): 1045~1052.
- [129] Handy M R, Brun J P. Seismicity, structure and strength of the continental lithosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 223: 427~441.
- [130] 滕吉文. 强化开展地壳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[J]. 地质通报, 2006, 25(7): 767~771.
Teng J W. Strengthen develop geophysical discover ore, exploration and exploitation of metal mineral resources in the second deep space of the crustal intenor[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(7): 767~771.
- [131] Teng J W. Someimportant scientific problems in current lithospheric physics research in China [J]. Appliet Geophysics, 2006, 3: 66~72.
- [132] 刘树臣. 发展新一代矿产勘探技术——澳大利亚玻璃地球计划的启示[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 53~56.
Liu S C. Towards the next generation of giant minerals exploration techniques; some considerations about the glass earth[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 53~56.
- [133] 李乐, 周蕙兰, 陈棋福. 地球内核的地震学研究进展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 238~245.
Li L, Zhou H L, Chen Q F. Progress in the seismological study of the Earth's inner core[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 238~245.
- [134] 滕吉文. 当今中国地球物理学向何处去[J]! 地球物理学进展, 2007, 22(2): 327~339.
Teng J W. Direction of geophysics in China[J]! Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 327~339.
- [135] 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 贺日政. 数值模拟在地球动力学中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 360~369.
Zheng H W, Li T D, Gao R, He R Z. The advance of numerical simulation in geodynamics [J]. Pregress in Geophysics, 2006, 21(2): 366~369.
- [136] 熊熊, 滕吉文, 许厚泽. 地幔热柱动力学研究新进展[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(1): 62~69.
Xiong X, Teng J W, Xu H Z. Progress of study on mantle plume dynamics[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(1): 62~69.
- [137] 滕吉文, 白武明, 张中杰, 杨顶辉, 等. 中国大陆动力学研究导向和思考[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 1913~1936.
Teng J W, Bai W M, Zhang Z J, Yang D H, *et al.* The guide direction and ponders for contineatal dynamics research in China[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(6): 1913~1936.
- [138] 路甬祥, 李喜先. 学科交叉与交叉科学的意义. 21 世纪 100 个交叉科学难题[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 9~14.
Lu Y X, Li S X. Significance of subjects crossing and crossing sciences, 100 crossing difficult problems in the 21st century[M]. Beijing: Science Press, 2005, 9~14.