

中国地球动力学研究的方向和任务^{*}

滕吉文 杨辉 张雪梅

TENG JiWen, YANG Hui and ZHANG XueMei

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2010-03-12 收稿, 2010-08-10 改回.

Teng JW, Yang H and Zhang XM. 2010. Development direction and task of the geodynamical research in China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):3159–3176

Abstract Geodynamics is a frontier subject in the study for the realization of large-scale motion of deep materials under force effect and understanding of the earth that involve the exchange of material and energy, different spheres and layer coupling, physical and mechanical mechanisms of differentiation and regulations in deep media structures and attributes, in deep dynamic processes. Geodynamics is integrated with research results of current high and new technology fields and cross-discipline, and involves the discoveries of the basic mechanisms of mountains, basins, minerals and natural disasters. It plays an important role in the study of the earth science. Four important basic scientific questions are as follows: (1) The role and function of geodynamics in the earth science; (2) The research development trend and direction of geodynamics at present; (3) Development direction and task of geodynamics in China; (4) Dynamical mechanism of substance movement in crust and synthetical study.

Key words Continental dynamics; Structure of the crust and the mantle; Substance and energy exchanges; Deep processes and dynamic mechanism; Direction and task

摘要 地球动力学是研究和探索地球内部物质在力源作用下,呈大尺度的运动行为及其在整体运动中物质与能量的交换、深部圈层耦合、介质与结构变异的物理-力学属性、深层过程和动力机制的一门边缘科学。地球动力学集成了当代众多相关学科和学科交叉领域的高、新学科研究成果,它涉及到成山、成盆、成岩、成矿、成灾和深化对地球本体的认识,它在地球科学研究中占有极为重要的地位。本文通过深入研究、综合集成与剖析讨论了该领域四个重要的基本科学问题,即:(1)地球动力学在地球科学研究中的地位和作用;(2)地球动力学研究的趋势和导向;(3)中国地球动力学研究的方向和任务;(4)地球内部物质运移的力源机制和综合研究。

关键词 大陆动力学;壳、幔结构;物质与能量交换;深层过程动力机制;方向和任务

中图法分类号 P541

地球动力学是地球物理学的重要组成部分,它涉及对地球内部不同圈层的层结构、物质的组成与物理属性、流变学行为、岩石和矿物的变形特征,以及岩石圈物质的运移轨迹和应力分布及物质运动的驱动力源与机制(Report Writing Committee, 1993; 滕吉文, 1990a, 1993, 1995; 赵文津, 2007; 许志琴等, 2008)。它关系着成山、成盆、成岩、成矿、成灾和深化对地球本体的认识,其核心乃是深部物质与能量

的交换、物质运移、深层过程、运动行为和动力机制(滕吉文, 2001a, 2003a)。

基于地球动力学在地球科学中的重要性,早在1911年,英国力学家洛夫(AEH Love)在他的名著《地球动力学的若干问题》中最早使用了“地球动力学”这个词,但文中只谈到了造山运动、固体潮、地球的自由振荡和地震等几个方面。不过早在19世纪下半叶,开尔文(Kelvin)就已研究过地球整

* 本文受国家自然科学基金华北克拉通专项(90914012)、国家973项目(2008CB425701)和汶川地震断裂带科学钻探(2008-20D)联合资助。

第一作者简介: 滕吉文,男,1934年生,研究员,中国科学院院士,主要从事地球物理学和地球动力学研究,E-mail: jwten@mail.iggcas.ac.cn

体的刚度,认为与钢的刚度相近。达尔文(GH Darwin)等还研究了黏性球体在引潮力作用下的形变。美国地球物理学家古登堡(B Gutenberg)分析了地球内部的作用力,并推断了地球内部介质的力学性质(滕吉文等, 2004)。

自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增添了许多新的内容(傅承义, 1972; Moores and Twiss, 1995)。有的学者从大地构造的角度出发研究了地壳的构造运动及在地表的表征;有的学者则从板块构造出发,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、固体潮和地球自由振荡等客观的力学现象。70年代,世界上各国学者组织了地球动力学计划(滕吉文等, 2004),其中地球动力学一词是指地球内部的力和变化过程的研究,其主要内容是验证板块构造学说,即与地球内部物理学几乎同义。这便充分表明,地球内部各圈层的精细结构、物质组成与物理属性、各圈层间物质与能量的交换和其深层过程与力源机制构成了地球动力学研究的主体内涵。随着地球科学的整体进展,特别是岩石圈、地幔、核-幔边界与地核以及天文学的研究进程使得地球动力学的研究得以不断深化。

地球动力学是以研究和探索地球内部及其远近空间物质运动和力源机制为重要对象,从地心到地壳,乃至星际空间地球物质的运动和行,并形成了门类众多的学科。半个世纪以来,随着板块构造的提出,特别是成山、成盆、成岩、成矿和成灾的深层过程与动力学响应的研究以及对地球本体不断深化认识的需求,地球动力学发展迅猛。为此当今出现了各种类型、各种内涵、各种定义和不同属性的地球动力学名称,如构造动力学、沉积动力学、地球化学动力学、成矿动力学、岩石动力学、地震动力学等。国内、外已出版的标名为动力学的论著也大量涌现,尽管所言地球动力学不一定与其内涵十分贴切,但却说明地球科学界对地球动力学的热宠,并给予了多元化的关注。

当今壳、幔精细结构和地球物理边界场响应的最新研究表明,大陆地壳并非简单地与大洋刚性块体类同,它没有一个共同的成因和起源,而且不但在纵向和横向都是不均匀的和各向异性的,其形成与演化也是非线性的,且将全球海、陆组构为众多由不同物质组成的,是属性不同块体的镶嵌。它们承受着大范围构造运动和热历史变异,深部流体和熔融体对其作用并改变着岩石圈的流变学结构(李昶和臧绍先, 2001; 刘绍文等, 2007; 嵇少丞等, 2008)。因此不同块体深部物质的分异、调整和运移使得在4维空间介质与结构的流变学响应和演化过程十分错综。因为它们具有复杂的深层过程、运动学和动力学属性,且发现运用经典的板块理论愈来愈难于解释大陆板内构造,这表明,海洋板块“登陆”的类比至少是不够充分的,有很多问题尚有待在机制上深化研究和探索。

撰写地球动力学的发展方向 and 任务这一问题有两种写法,一种写法是抄、编和浓缩国外已有版本,另一种写法则

要在他人的基础上依据自己的认识和理解去提炼,并对今后的发展,特别是中国地球动力学的发展凝练出新的方向、任务和内涵,我们当然是采取了后者。对于这一基础性很强、涉及面又极为广泛的科学问题,当必有其自身发展的继承性、连续性和创新性,当必要注入自己的认识和论点与论据,而着重论述或阐明其科学的主体内涵和导向乃是本文的基本原则和任务。

中国地球动力学的研究必须在科学发展观指导下,遵循国家战略需求和自主创新的方针来发展。基于此本文将讨论以下四个问题:地球动力学在地球科学研究中的地位和作用;地球动力学研究的趋势和导向;中国地球动力学研究的方向和任务;地球内部物质运移的力源机制和综合研究。

1 地球动力学在地球科学研究中的地位和作用

地球动力学在地球科学研究中的地位和作用与其在祖国快速工业化和经济腾飞中的作用乃是其能否快速发展和取得成效的根本所在。

1.1 何谓地球动力学

在人类历史进程的长河中,在人们探索地球的起源、发展和活动中,人们只有在承认地球为维系人类生存提供一切物质源泉后,才能真正认识到了解地球和提高生产、提高生活水平与质量之间的直接联系。对于地球这样一个复杂的物理、化学和生物体系的探索,必须采用当代最先进的科学方法,引入最先进的高、新技术和训练有素的、高造诣的、多元化的梯队人才及群体方能奏效。

为此,我们必须首先厘定,何谓地球动力学?

地球动力学是建立在普通的固体变形力学、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。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,既有先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物理学和力学学科的研究对象所能比拟。为此若忽略了壳-幔介质深部结构、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本质内涵。正是这样,故可将地球动力学视为一门应用力学,它又是地球物理学的一门分支,却又必须涉及众多的学科领域(滕吉文等, 2004; 滕吉文, 2004, 2005)。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),在其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。它既不同于体现运动学的地质构造,也

不同于体现组分的地球化学,它是以物理学的基本理论为依托,以数学和计算机技术为工具,以实验和观测为主要手段,以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,必须体现科学交叉,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、调整和运动的物理-力学-化学过程和物质组成及其对表层过程的运动学响应和对地表派生现象的理解(滕吉文, 2005)。

所以,地球动力学只有建立在多学科的交叉、综合和不同学科之间的协同与集成基础上,方能取得成效,并获得新的认识和新的理念。

1.2 作用和地位

地球动力学对人类生存和社会发展具有举足轻重的作用,因为地球是人类居住、获取各种资源、能源、改造和利用的重要场所,是地球科学整体发展的基础和生长点。在 20 世纪的百年中:地球动力学在深化认识地球本体,研究地球内部圈、层耦合,不同块体之间的运移轨迹,地震和火山爆发,资源与能源的形成与聚集,全球变化,日地空间响应,军事与国防等领域均取得了巨大成就,为科学与技术的创新,社会与经济的发展和造福于人类与“净化”人类生存空间等诸多方面,做出了卓有成效的重大贡献(滕吉文, 2003b, 2004, 2006a)。

地球动力学的最终目标是了解地球本体及其从太阳系中诞生到它目前状态的演化历史,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,即了解整个地球和其系统的过去、现在和未来的行为,建立行星地球的整体理论,并利用这种认识为人类生存提供可持续发展的物质与环境基础。因为地球深层过程和动力学响应研究的宗旨必须是促进地球科学与技术的飞跃,为人类提供一个可持续发展的良好生活与生存空间,并造福于人类。这主要表现在:(1)在经济发展与建设中的效应;(2)在社会发展中的角色;(3)在深化认识地球本体中的地位。

1.2.1 在经济发展与建设中的作用

当今世界社会文明的发展在很大程度上是以建立在廉价的地球资源和开发利用的基础上。因此全世界大多数国家都将资源(金属矿产、油、气、煤和水)的勘探、开发与合理利用列为经济建设中的首要问题之一(滕吉文, 2003b)。

一次性能源(指煤、石油、天然气、油页岩,约占世界年矿物开采量的 85%)在世界经济活动中有着极为重要的地位。金属与非金属矿产的勘探、开发,特别是大型、超大型矿床和矿集区深层找矿和矿产资源后备基地的建立等表明(滕吉文, 2006a, 2007b; 滕吉文等, 2007a):地球动力学的理论、方法和技术已渗透到煤田、油、气藏勘探与开发(包括大陆、陆缘与海域及极地)的每个环节,对资源和能源的勘查、认

定、评价及开发等均需地球动力学为之提供深部流体运移的轨迹和矿产形成与聚集的深层动力过程和机制。可以这样说:20 世纪后半叶以来,离开地球动力学的理论、方法及与之有关的高新技术,金属矿产资源的勘查、开发、储量的增加和采收率的提高均是难以想象的。

在这 21 世纪初叶能源与资源如此紧迫的形势下,如何发展高新技术,向地球深部,即第二深度空间(滕吉文, 2006a, 2007b; 滕吉文等, 2007a)(金属矿产资源和煤炭为 500~2000m,油、气能源为 5000~10000m)和向海洋索取金属矿产资源与油、气能源,要达到这一目标,则必须深化研究它们形成与聚集的深层过程和动力学响应。

1.2.2 在社会发展中的角色

人类社会面临的发展问题很多,如能源、环境、灾害、水资源、人口控制、全球变化、种族歧视、大国强权等等。在这些领域中,减灾、环境和能源问题被联合国列为榜首,这些均与地球动力学的发展密切相关。

20 世纪 90 年代是国际减轻自然灾害的十年,水灾和地震及火山喷发仍是危及人类生命及物质文明成果最为严重的自然灾害。尤其 20 世纪末叶以来大规模的强烈地震、破坏程度及震后的惨景往往给人们的心灵和社会意识留下了难以忘怀的记忆(如近些年来中国云南丽江地震、中国台湾集集地震、土耳其地震、俄罗斯地震、日本地震、四川汶川大地震和刚刚发生的海地地震等等)。为此各个国家和国际上均给予了极大的关怀和支援。

全球变化和环境问题乃是近年来社会普遍关注的核心科学问题之一。由于它是不均匀的和非线性的四维过程,这就必须去研究和探索在全球地球动力的大环境下,不同地域的动力学响应(滕吉文, 2008)。

近年来有关地球物理战争与地球物理武器问题以及海洋潜伏物侦查和弹道导弹飞行路径导航等方面,地球动力学均必然地为之提供着理论、方法和边界场效应。

1.2.3 在深化认识地球本体中的地位

早在远古时期,人类就意识到地球是维系人类生存和社会发展的物质源泉。因此,无论是古希腊的哲学家、还是中国的古代先哲,都试图探索地球的形成和结构的奥秘。应当看到,在那一时期中近代地球科学的发展对 17 世纪西欧的第一次工业革命有着一定的促进作用。近半个世纪以来,面临第二次工业革命的挑战,地球科学家们创立了板块构造学说和地幔对流说[源于地球物理学家(Alfred Wegener)提出了大陆漂移学说],实施了一系列新的星球探测技术,且在日地关系研究中取得了长足的发展,在这一进程中,地球动力学起到了先导作用。地球科学的实践和发展表明,只有地球动力学能为研究地球内部和球外空间的介质结构、物质运移和圈层耦合提供直接的或间接的、量化的和有相当规模与精度的信息及驱动机制。

地球动力学的发展体现了物理学、力学、数学、信息科学等学科向地球物理学的渗透与集成,而地球动力学的发展又

反过来促进了现代物理学、力学、应用数学、计算数学、信息科学、电子学及其它应用科学的发展,特别是在资源、能源、完善和深化认识地球本体中,地球动力学研究将必会产生极大的响应。这便充分表明,各个学科之间的相互交叉、互补与启迪乃是自然科学整体迅速向前发展和获取新发现,即一门新的边缘学科建立之必然。显然,20世纪末叶以来,地球动力学已逐渐成为地球系统科学中最重要的一个领域,在21世纪地球科学的发展中必将成为先导(滕吉文,1995,2003b,2006b)。

2 当代地球动力学研究的发展趋势和导向

国际上在地球动力学的发展,在科学内涵和方向上不仅各有侧重,而且也是不平衡的。基于对地球本体认识的不断深化和新的发现,不断推动着地球动力学的前进,世界各国间均存在合作与竞争中发展,中国地球动力学研究也必然要在合作中求进步,在竞争中求生存,不断开拓新领域,并造福于人类。

全球化的行为使得世界各国的科学家必然地卷入了全球性的地球动力学的研究大潮之中(滕吉文,2008),1957~1958年国际地球物理年标志着,地球动力学的研究开始进入到全球化的新阶段。60年代的“上地幔计划”,70年代的“地球动力学计划”,80年代的“岩石圈计划”和以后发展的大陆和大洋钻探计划,地学大断面计划,国际减灾十年计划,全球变化计划,大陆动力学计划,地球环境模型,日地物理计划,地球空间环境计划和日地能量计划等等,这些计划的实施与完成在地球物理学以至整个地球科学领域里均产生了极为深刻的影响。

随着科学和技术的进步,新的观测手段和实验方法不断涌现,尤其是高精度的地震反射、宽角反射和折射波场的深部探测、高分辨率层析成像技术、高温高压实验技术、高精度重力场、磁力场和大地热流测量以及GPS定位和InSAR技术等方面的发展均为地球动力学的研究提供了强有力的手段,所以地球动力学研究面临着空前的机遇和挑战。

2.1 地球动力学的发展趋势

近年来有关地球动力学的研究计划已从全球性转入到区域性的研究,在更深层次上去探索其力源机制,以达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》(Report Writing Committee,1993),这一具有导向性的研究计划在国际上产生了重要反响,该计划提出的地球动力学具挑战性的基本科学问题有:大陆的成因和演化、下地幔及其与地壳的相互作用、地震与板块边界的相互作用、大陆地壳中的岩浆的成因和动力学、大陆岩石圈的变形和活性、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全球研

究中关键的地球系统历史等(Report Writing Committee,1993;赵文津,2007)。

这一以研究大陆各层圈的物质组成、结构变异、运动行为、动态演化和驱动力系及以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重视。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地球动力学计划,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 Glasses),近来又提出了进一步深化研究的计划等(滕吉文等,1997;滕吉文,2006b,2007a)。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、大陆地壳的超深俯冲、中欧的年轻地幔柱以及地壳应力与应变的时间和空间变化等10大研究内容,并将大陆地形4维变化研究称之为综合固体地球科学的新前沿。欧洲也提出一个包括有4大科学问题在内的欧洲岩石圈研究计划,这些计划的规模都十分宏伟,且都是围绕着解决本国所在的大陆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,它是多学科综合与交叉的结果,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。

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。当今在地球动力学研究中,地球内部壳、幔精细结构和深层物理学作用过程已成为重要内涵,为此在几个重要方面应给予特别的关注,即板块俯冲带岩石圈的脱水和岩浆活动;岩石的相变和地震不连续性与深源地震的成因机制;水和流体在地幔中的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;地幔热柱、热点结构和物质运移;地幔对流过程中物质的混溶和分异;复杂动力过程的物理、数学模拟,高温高压物理和状态方程等(滕吉文等,1997;滕吉文,2001b)。显见,当今的地球动力学研究已由地壳走向地幔,乃至地核。为此要在以上这几个方面取得成效或突破性进展不仅需要各学科之间的密切协同和指向性的国际合作,而十分关键之处在于必须拥有高精度、高分辨率和高稳定性的观测和实验仪器与设备,以及高性能的超级计算机系统。

这便表明当今的地球动力学研究不仅仅涉及地壳,而且当必要涉及地幔和地核,为此地球内部的深入研究已成为地球动力学研究的主导和核心。

2.2 中国地球动力学研究和发展导向

21世纪的头一二十年,将会是人类社会发展的一个巨大

变革时期。地球动力学在经历了以活动为内涵的板块构造和行星际探测这双重革命的重大发展时期以后,现正处在一个新起点上。从全球地球科学发展的总体趋势来看,它的未来正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。随着研究的深化和高新技术的不断引入与应用,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。

中国地球动力学与其他自然科学一样都面临着共同的机遇,同时,挑战也是十分严峻的:如人口问题、资源问题、灾害问题和环境问题等等(滕吉文, 1990a, 1993, 2003a, 2006a, b, 2007a; 滕吉文等, 1997)。为此,地球物理学家必须突破原有的“框架”,特别要在资源、灾害、环境和全球变化研究中,基于地球动力学的内涵和导向,开创一条新的征途,为深化认识地球本体做出新的贡献!

在我国的地球科学领域里,基于 21 世纪初地球科学发展的战略目标和从地学大国走向地学强国的宏伟构思对中国地球科学的发展十分关键。依据地球内部的深层动力过程可见,在地球科学领域里急待解决的科学问题和与这些科学问题相对应的社会需求是多元的。可是人们可以看到,不少问题在源与本质上均涉及到地球动力学,又有很多方面则必须通过它去探索,故均与社会和经济的发展密切相关。在国家利益和国家安全方面,对地球物理学和地球动力学的需求也是十分迫切的。显然,地球动力学所要研究和探索的科学问题很多,故表明:一个国家地球科学的发展程度,地球动力学的观测能力、研究水平和其所取得的成效,既是这个国家综合国力的一个明显标志,也是保持自己独立主权、领土完整和独立于世界民族之林的必须举措。

正如希尔伯特所说:“只要一门科学分支能提出大量的问题,它就充满着生命力,而问题的缺乏则预示着独立发展的死亡或中止”。地球动力学是地球物理学领域的重要组成部分与分支,因此它必须以地球物理学,特别是深部探测和地球物理场效应为基石,方能有效地深化对地球本体的认识。

深部物质与能量的交换和其深层动力过程的研究乃是深化认识地球本体,并造福于人类的必须,即为 21 世纪地球物理学发展的根本导向。基于这样的前提,在地球动力学研究中一定要结合地球科学的发展、中国的实际国情与需求,并期待在近期取得突破性进展,以得到成效,并为世界地球动力学研究进程做出应有的贡献。

3 中国地球动力学的研究方向和任务

中国大陆和临近海域在印度洋板块和太平洋板块的共同作用下,形成了一个破碎镶嵌的地块组合,而青藏高原的隆升和南海的下沉乃是中、新生代以来东亚最为壮观的地球科学事件。这亦决定了中国必须把地球动力学研究的重点

放在板内和板缘。这是因为我国拥有大量的陆内盆地、造山带,且处在环太平洋地震带和地中海-喜马拉雅-南亚地震带的包围和三大板块陆-陆碰撞与洋-陆俯冲的动力环境之中。为此在深入地开展板内、板缘地球动力学研究的基础上,对以下 5 个方面乃是在近期一段历史进程中,必须深化认识和攻克导向性科学问题,取得进展之中的重中之重。

3.1 资源、能源和灾害是当今地球动力学研究的主攻方向

矿产资源的成因,油气沉积盆地的形成,地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境,地球圈层的耦合和块体的运移,均涉及到在力源作用下物质的重新分异、调整、运移和动力作用过程及机制。因此,它必然要成为 21 世纪地球动力学研究与探索的“焦点”,即在资源、能源、灾害和环境的深化研究中,从力源机制和成因上给出新的认识、并建立起新的运动学和动力学的模型。

为此,地球深部各圈层的结构与动力学研究便涉及到人类的生存与生产活动和社会发展与兴衰的方方面面。这便迫使人们必须对地球整体的深层动力过程和圈层耦合与力源体系研究取得一定的突破,则必须有一个新的思考,即将这一领域作为一个与国家战略需求密切相关的“地球科学的系统工程”来研究和探索。

进入本世纪以来,随着国家建设事业的快速发展,资源和环境问题更加突出了,加之我国大陆又是一个地震多发地域,据有关方面透露,在灾害频繁的年份,我国由灾害造成的损失竟会高达国民生产总值的 1/6 左右。如 2008 年汶川 8.0 级大地震死亡达 8 万人左右,伤达 30 多万人,震中地区的汶川-映秀和相邻地带的北川、青川、理县等地房屋 80% ~ 90% 被毁,而且次生灾害又给灾区人民造成了极大损失并为世人所震惊。据不完全统计,这次地震灾害所造成的损失高达 8000 亿元人民币或更多。为此国家和国际上给予了极大的关怀和支援。

针对地震灾害所带来的影响,1998 ~ 2003 年国家曾立项开展了“大陆强震机理与预测”的研究,有国家地震局、中国科学院、教育部和国土资源部的一些单位与部门参与研究。该项目从板块构造、活动块体运动与变形和深浅构造关系三个层次上研究了大陆强震的构造背景和机理,初步探讨了大陆强震孕育发生的过程、发生和地点,并提出了中长期强震危险地段综合判定的方法和重点研究区未来 10 年尺度地震危险性的预测意见。2007 年全国地震科技会议的召开,指出了进入 21 世纪以来强烈地震将会频频发生和东亚已进入活动期,得出在 2006 ~ 2020 年间我国大陆将会发生多次强烈地震的危急性等。2008 年中国科学院、中国地震局、国土资源部等单位对四川汶川 Ms8.0 强烈地震“孕育”、发生和发展的深层过程和动力机制进行了研究和探讨(滕吉文等, 1997; 滕吉文, 2001b; 滕艳, 2008)。

在资源、能源方面,2006 年国家颁发的《国务院关于加强地质工作决定》中,提出了要开展 6 大地质工程,其中之一

便是开展《全国地壳探测工程》,并成为国家解决资源环境瓶颈问题总体部署的一部分。特别是大型、超大型矿床和多金属矿集区的形成,必须从深部地壳、上地幔深部物质与能量交换的岩浆活动和构造运动来思考和实施找矿勘探与开发。2006年基于国家要快速发展而矿产资源紧缺的供需严重矛盾下,由中国科学院院士向国家提出了“迅速强化金属矿产资源第二深度空间(500~2000m)找矿勘探与开发”的建议(滕吉文, 2006c),并迅速得到国家的重视,接下来中国地质调查局于2007年在安徽合肥召开了全国深部找矿会议,2008年1月8日国土资源部发布了指导意见,提出科学规划部署深部找矿,开展主要成矿区带地下500~2000m的深部资源潜力评价,重要固体矿产工业矿体勘查深度要推进到1500m,即吹响了向深部要资源的号角。

这就将中国大陆动力学的研究提高到了一个新的国家层面上,故必将会使我国的地球科学步入到一个新的历史阶段。

3.2 第二深度空间(500~2000m)金属矿产资源形成与聚集的深层动力过程

矿产资源是人类社会进步,科技发展和经济腾飞的命脉,世界上不论是早期发展的英国、法国、俄国,还是后来居上的美国、德国、加拿大等国都离不开大量资源的消费。然而自古至今却是在表层或浅层地层中去找矿勘探和开采,即我们将其定义为第一深度空间(0~500m),但问题是金属矿产资源的形成与聚集是源于深部,这就是说究其成因必须探索地壳深部的“奥秘”,即第二深度空间(500~2000m)(滕吉文, 2006c; 滕吉文等, 2007a, b, 2009a, b)。

加拿大萨德伯里(Sodbury)铜、镍矿床已开采到2000m,最深的金属矿井又打到3050m。南非金矿已钻井抵4800m。中国的大冶铁矿,红透山铜矿,铜陵冬瓜山特大型铜矿,新疆阿尔泰阿舍勒铜、金、锌特富矿床,会理麒麟铅、锌矿,山东增城,乳山金矿床等已其开采和钻井深度均已达到和超过了1000m,有的矿床已近2000m。显然第二深度空间找矿、勘探已成为成矿动力机制与实践的新空间和新机遇。

金属矿产资源第二深度空间的勘查和深部动力成矿新理念提出,当必首先要理解深部成矿和预测的理论依据和从实践中获取规律性的认识(滕吉文, 2006c)。当今由国土资源部组织实施,并有中国科学院和高校参加的国家“深部探测技术与实验研究”专项已在启动,该项目选择我国东部华南地区的南岭和长江中下游成矿带为代表性矿集区加以剖析,如铜陵、庐枞、于都-赣县等,部署分为两个层次(深部30~40km和浅部3~5km)的综合地球物理(反射地震、MT、高重磁等)精细探测和浅表2000m的参数钻探实验,以揭示代表性矿集区形成的深部构造背景、动力学过程及其对成矿系统形成和演化的制约;精细刻画矿集区3~5km深度范围内立体精细结构和物质组成,追踪主要容矿、控矿构造、含矿岩体的深部延伸,进行“第二深度空间”资源勘查,研究深部

成矿规律,建立深部成矿模式,开展深部成矿预测。开展2000m参数钻探,直接验证重要异常和成矿靶区,揭示地壳浅层金属矿产资源的垂向变化规律,以提高对深部成矿规律的认识。

近3~5年来金属矿产资源的第二深度空间找矿勘探在全国各地大力展开。近年来通过高精度地球物理勘探,特别是航空磁测和大功率电法勘探(滕吉文等, 2007a, b, 2009a, b),已取得了重大进展,现举几个例子来加以阐明。例一:湖北的大冶铁矿。通过高精度的航空磁测提出了五个重点找矿区,在第二重点找矿区已在740~840m深处发现数层铁矿,累积厚度达14.6m,第三重点找矿区于732m处已见矿,层厚达5m左右,其他矿区尚在进行中。例二:山东增城、乳山金矿矿体延伸已达900~1000m;四川会泽铅、锌矿向下已深抵1300m;东北红透山矿床向深伸抵1300m。辽宁本溪桥头大台沟铁矿,2009年底已钻抵2200m,但尚未穿透铁矿层,估计至少要达到2500m深;其他如在长江中、下游和新疆各地均取得了明显成效。推进了深部动力成矿理论和成因的研究,且为在深部第二深度空间发现大型、超大型金属矿床和多金属矿集区提供了指南。

3.3 第二深度空间(深度在5000~10000m)油、气能源的形成与聚集和潜在空间

中国大陆经历了漫长的地史变迁和构造演化,现今各大沉积盆地中一般均存在从古生界到新生界的海相、海陆过渡相和陆相等类型的巨厚沉积建造,故表明这种双相(陆相+海相)沉积盆地中的油、气能源蕴藏丰富。但由于它受到多期次构造运动的作用,故分布、构造和岩性均十分复杂,并给地球物理勘探和开发带来了不少难点。

为此,多年来在我国油、气勘探和开发中,油、气田的目的层在西北地区主指侏罗纪,而东部地区则集中在白垩纪。当今的问题是,怎样正确理解沉积盆地,基底和油、气的形成与储积。这不仅在理念上必须重新厘定,而且必须以海相和陆相沉积为基础编制新的沉积盆地分布图以更换以陆相沉积为主体的盆地划分图。

基于半个世纪以来的实践表明,我国各沉积盆地中不仅存在着中、新生代的陆相沉积,在深部亦存在着丰富的海相沉积,古生代的沉积地层并未变质或仅仅轻微变质。为此提出了,我国的沉积盆地为双相(陆相+海相)沉积建造;基底为古老的变质岩基岩,即为结晶地壳的顶部。同时油、气应为双机(有机为主,无机亦参与了油、气的形成)混合成因的新理念,发现并提出了第二深度空间(5000~10000m)油、气地球物理勘探和开发的新方向(滕吉文, 2006c, 2007b; 滕吉文等, 2006a, 2008b, 2009c),此乃21世纪化石能源获取的必由之路!

为此突破侏罗纪、白垩纪,向古生代沉积建造、及海相地层“挺进”,且已发现了一系列的大型油、气田,如冀东南堡油田、普光气田等,四川盆地东北部、东南部的油、气田等不断

涌现。在以前油、气勘探与开发的禁区,即古生代火山岩系中也存在着丰富的天然气藏和油藏,如松辽平原的徐家围子、长岭地带,准噶尔盆地东北缘和东部(不仅天然气丰富,而且石油亦丰富),以及四川盆地等。南堡凹陷深部富存油、气,且层系多,主要为奥陶系、古近系(E_2S 与 E_3d)、新近系(Ng 和 Nm)。近年来勘探表明, E_3d_1 和 Ng 、 Nm 普遍含油气,故勘探潜力仍很大。油、气来自区域性盖层以下的烃源岩层系,而断层、储集体和不整合面在油、气成藏和运移过程中起着重要作用。

在我国西北地区,自1984年以来塔里木沙参2井实现了中国古生代海相油、气藏的重大突破,宣布了塔河大油田的诞生。

塔里木盆地寒武、奥陶纪海相地层中蕴藏着丰富的油、气能源,中石化塔河一深钻井钻抵8840m还发现有巨厚的白云岩相沉积和液态烃。在深层隐蔽油、气勘探,古岩溶油、气勘探,海相岩碳酸盐岩油、气勘探等方面均取得了长足的进展,特别是普光大气田、南堡大油田和塔河大油气田的发现,为21世纪的勘探前景和方向奠定了坚实的基础。

应当清晰地认识到,在我国的西部和东部海相沉积建造和火山岩地带当必是我国未来油、气勘探与研发的主体(滕吉文,1974,1999,2007b;滕吉文等,1973,1983,1994,1995,1996b,2008a,b,2009c)。在世界各地油气勘探和开发中,如中国、俄罗斯、乌克兰等国家的油气中,早已突破了已有的门限3500m,且已抵5000m以下,达7000m或更深。美国墨西哥湾已达7620m。我国在塔里木盆地由中国石油化工有限公司打下了一口8040m的深井,不仅在深部存在保存良好的沉积建造,而且存在有深源烃源岩。普光气田更深埋达7000m以上。这便充分表明,除中、新生代的陆相沉积建造外,古生代的海相沉积建造尚有很大潜力,所以说我国在第二深度空间的油、气勘探和开发有着广阔的空间。

3.4 强烈地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境与其形成的深层动力过程

自中、新生代以来由于青藏高原的隆升,南海的下沉,这一高一低构成了我国乃至东南亚地域最为壮观的地球科学事件。在全球动力作用下,板块、板缘、板内各块体有着不同程度和不同方式的活动,使之中国成为世界上地震活动频繁、且又强烈的国家之一。

由于我国的地震活动频度高、强度大、分布广,受灾率亦必高。在全国百万人以上的大城市中,有70%位于烈度为七度或高于七度的地震区,加上震源浅,建筑物抗震性能差,因而城市地震灾害及其后果严重。地震与其他自然灾害的不同之处,不仅在于它的破坏力猛烈,而且在于破坏力集中,而更为严重的却是突发性强。当今强烈地震灾害已构成威胁着我国经济发展和人民生命财产安全的严重自然灾害之一。例如汶川 M_s 8.0级大地震沿龙门山断裂系地表GPS测量所得变化速率均较鲜水河断裂带、安宁河-则木河-小江断

裂小得多,地质构造则为第四纪以来,即1.8Ma以来。显然依地表浅层过程不具备大地震发生的条件,可是大地震却在这里发生了。经研究这次大地震发生是由于巴颜喀拉块体由西北向东南运移过程中,相对较软的壳、幔物质受到四川盆地“刚性”块体的阻隔和龙门山3条西倾的断裂向深处汇聚,而深部下地壳和上地幔盖层物质以上地壳底部低速层为第一滑脱面,以上地幔软流层顶面为第二滑脱面,且沿近于垂直的龙门山断裂系向上逆冲,且在上、下物质运移过程中在深度为 15 ± 5 km处碰撞的共同作用所致(滕吉文等,2008c)。

这便充分表明,强烈地震的“孕育”,发生和发展的物理机制不是地表的浅层过程,而是深部物质和能量的交换和其深层动力过程所致。浅表层过程仅是深层过程在地表派生现象的表征。

为此强化对地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境与其形成的深层动力过程的研究乃是“把握”震源及其周边介质与结构“脉搏”的关键所在(滕艳,2008;滕吉文,2009;滕吉文等,1974,1975,1982;Teng,1981),它在地震预测研究中占有重要地位(陈运泰,2007)。我们必须充分认识到:

(1)强烈地震的“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境与力学机制是一个物理-力学过程,当必涉及到震源区及其周边地域的介质属性和结构,这对探索未来强震发生地点的预测具有重要的指示作用;

(2)地震的发生是震源深处介质的破裂响应,而破裂的时序、速度、方向、长度和波动的辐射空间乃是与地震发生的强度和空间环境(包括介质属性和结构)密切相关;

为此深井微破裂的产生与在应力积累过程中,深部破裂链的形成和早期观测乃是对强烈地震短、临预测的重要途径,这就必须对地震强烈活动区(带)的地震活动进行长期不间断的监测;

(3)地震震源处介质的破裂与反演仍是一个近似结果,不论在理论上、方法上和实际应用上均尚有待不断完善,有待多元数据的积累,多要素的约束,以达在地震发生后快速取得逼近的效应,并积累强烈地震发生和发展的地球物理过程;

(4)地震活动区、带地域深部应力积累和不均匀性及非线性变化,在前述(1)、(2)、(3)深层过程的基础上,并通过物理-数学模拟,实际应力与应变观测,区域性地带强烈地震发生的统计效应,考虑浅表层过程(如GPS测量、InSAR观测等)的综合分析与集成,以资提取强烈地震发生的要素和逼近的震级、地点、时间概率。

3.5 造山带和其与盆地的耦合

造山带和盆-山耦合的研究关系到它们的形成与演化的深层过程和动力学响应,同时与资源、能源、灾害和对地球本体的认识密切相关。

3.5.1 造山带是地球动力学研究中的核心问题之一

巨型的造山带不仅标志着板块汇聚造山的历史,而且板块运动、扩张和深部物质的上涌,板块裂解与洋盆扩张,俯冲和消减等过程亦均在这里刻划下了印迹。实际上地球上的很多复合造山带却是长期活动的构造带(许志琴等, 2008)。然而人们对复合造山带长期活动的深层过程和力源机制却并不十分清楚。

近年来大陆造山带深部地球物理研究揭示了造山带岩石圈的物理状态具有流变学分层结构,壳内、幔内的低速层(高导层),古造山带无山根,莫霍面呈水平状,软流层的巨大起伏,岩石圈地幔的减薄,地壳、地幔的非均一性与各向异性等特征(滕吉文等, 2000a; 滕吉文和张中杰, 2000b)等使得人们对造山机制的研究得到升华。

当今对造山带的研究正在由单一造山带向复合造山带研究及综合研究过渡。但地球上绝大部分复合造山带的长期活动原因至今尚不十分清楚,这主要是其动力机制并不能形象地以“碰撞造山”来解释。根据科迪勒拉造山带具有长期弱化、低强度、厚度较薄和较热的岩石圈特征认为(Hyndman *et al.*, 2005):造山带的花岗岩基、高级变质作用和韧性变形所导致的造山热能来自于原先的弧后热岩石圈,而不是来自造山的变形过程。

人们可以看到,地球上的很多造山带都经历着长期的构造活动带(>300Ma),例如太平洋东岸、美洲大陆西海岸近1000km、长度超过10000km的科迪勒拉造山带就是长期活动的复合造山带的典型代表。早在200Ma之前,该造山带曾经历过多次的造山运动,如奥陶纪(425Ma)、泥盆纪(380Ma)、晚古生代(约300Ma);青藏高原也是一个巨型的复合造山带,它的形成经历了早古生代、三叠纪、晚古生代和新生代造山带的多期次的构造运动及拼贴过程(许志琴等, 2008),有人称其为“造山形成的高原”(Dewey, 2005)。然而它却呈现了亚洲大陆从北向南的增生过程,而喜马拉雅则是其中最后形成的一条造山带,而现代喜马拉雅造山带的前身则应是泛非-早古生代形成的原始喜马拉雅造山带(许志琴等, 2005)。这里必须重视的是,喜马拉雅造山带的形成,东、西弧顶以刚性“尖楔”状向北扞入青藏高原东部,并强烈影响着其东北部和西北部以及其周边地带的构造运动及其对成矿和成灾均起着极为重要的作用(王谦身等, 2005; 滕吉文等, 2006b)。

3.5.2 盆-山耦合的动力学响应

早期对盆地的研究很注重其分类,当然主要是与油、气勘察密切相关。自20世纪末,即20世纪90年代以来,地球动力学计划中则把盆地与山脉作为一个有机的整体研究已成国际上地球科学界的一个重要研究领域。通过全球地学断面(GGT)计划的实施,改变了以往将盆地和山脉分别进行的历史。但对盆-山耦合过程、演化和机理,迄今尚缺乏系统的分析和研究,即在认识上主要是还停留在浅表层过程的描述。

同时还应看到,过去的研究重点主要放在沉积盆地与相邻造山带的沉积关系上,而对盆地和山脉之间的耦合和其演化过程却涉及甚少。大陆造山带内原型沉积盆地构造的恢复乃是造山带研究中的重点和前沿科学问题之一(Dickinson, 1993; McCann *et al.*, 2003; Busby and Ingerso, 2005; Link *et al.*, 2005),而深部物质的分异、调整和运移则是盆-山耦合研究的主体内容(Dickinson, 1993; 滕吉文, 2003a; Link *et al.*, 2005)。基于现代板块构造理论将沉积盆地与造山作用紧密联系起来,并按照造山作用类型对沉积盆地进行了分类(Busby and Ingerso, 2005),这些不同类型沉积盆地在地史期间曾详细地记录了一系列的构造运动与事件、板块、板缘和板内块体相互作用及造山带的演化过程(McCann *et al.*, 2003)。大洋板块俯冲与消减作用、陆壳之间的碰撞与拼合及增生作用、各类块体的碰撞以及造山带晚期大规模推覆和走滑作用等使得造山带内不同大地构造单元发生裂解和破坏(Moores and Twiss, 1995)。沉积盆地作为造山带最为重要的大地构造单元之一,在造山带演化过程中因强烈的构造变形而使得其原型发生破坏,从而导致了造山带内沉积盆地的构造原型恢复难度增大,进而影响着造山带构造恢复的研究工作进程(许志琴等, 2008)。

当今在造山带和盆-山耦合的研究中,必须对大陆造山带与相关沉积盆地之间的深层动力过程进行详细探讨,因为这是揭示板块内构造作用和大陆增生作用的关键所在。在对大陆造山带内沉积盆地构造原型恢复和盆-山耦合这一前沿科学问题研究时,则必须对其深部物质和能量的交换、运移和其力源机制进行研究和探索(滕吉文, 2005)。因为它们确与成山、成盆、成矿、成灾有着极为密切的内在联系。

3.6 青藏高原大陆动力学

青藏高原在印度板块与欧亚板块长期碰撞、挤压作用下,故其是一个巨型的碰撞造山过程的产物,它的形成与始特提斯、古特提斯和新特提斯洋盆的先后开启、消减、闭合及古大陆裂解、各地体运移、会聚和拼合相关,而造山类型则与不同时期海域俯冲、地体碰撞和陆内会聚的不同阶段有关。青藏高原在长期地质历史演化中,在不同时期形成了从俯冲、碰撞和深部物质的重新分异、调整和运动,而在板内则导致了各种类型造山组构的山链、复合山链和高原的整体隆升。显然,认识青藏高原特异的造山类型及其深层动力过程乃是研究碰撞动力学的主要内容。

青藏高原是在水平向和垂直向错综复合力系作用下的一个耦合块体,不仅受到南、北方双向力系碰撞与挤压作用的影响,并持续向高原腹地作用,促使高原壳、幔深部物质重新分异、调整、运移,地壳短缩、增厚,而且在喜马拉雅弧形山系的东、西“构造结”区均形成了一对力偶的作用,构成了青藏高原及其周边地域错综复杂的构造格局和动力学响应(滕吉文等, 1997, 1999, 2006b, 2008c; 滕吉文, 2003a; 许志琴等, 2005; 王谦身等, 2005; 王二七等,

2001)。

因此,结合当今在青藏高原大陆动力研究中进展及其面临的机遇,在近期内有望进行和突破的几个科学问题必须给予重视。

3.6.1 喜马拉雅弧形造山带弧顶地层的深层动力学响应

东、西弧顶,即“东、西构造结”区的介质属性和构造格局及其深层过程制约着高原地域(特别是高原的东、北缘,东部和西北缘及西部)的深、浅构造格局与运动学和动力学效应(滕吉文等, 1999, 2006b; 王二七等, 2001)。

(1) 东、西“构造结”区本身的深部精细结构与物质属性;

(2) “东构造结”插入高原东缘的力源和运动轨迹、样式,以及其在高原东北缘产生了什么样的变形和深层动力过程?

(3) 构造结区深部物质和能量的交换与动力学响应。

特别要对水平力系和垂直力系共同作用及其所导致的深、浅构造运动和力源机制给予深化认识。

3.6.2 青藏高原深部物质的侧向运移

(1) 是逃逸、是挤压、是流展……在区域物理-力学作用过程中和动力学效应上存在分歧吗? 异同何在?

(2) 介质的应力状态、分区属性和构造背景是什么?

(3) 深部壳、幔物质侧向运移的轨迹、边界条件和效应及其对2008年汶川8.0级地震的响应;

(4) 何处为物质运移通道,通道侧向限定边界和底界的构造特征? 它们受到何种要素的制约?

(5) NS向的短缩量按什么方法和要素(纵向与横向)来估算? 精度如何?

(6) 高原腹地深部物质侧向运移的特点、响应与对周边构造运动的作用。

物质运移的轨迹:壳、幔物质侧向运移走不走“西口”? 即高原物质只向东运动而不向西部运移吗? 物质运移的边界条件、要素、特点和量化。

3.6.3 印度洋板块与欧亚板块碰撞、挤压的运动学和动力学模型

(1) 遵从的物理-力学理念和合理的物理-力学机制;

(2) 深部物质的运动学与动力学背景和必要与充分条件;

(3) 陆-陆碰撞的时限与地球物理边界场的响应;

(4) 建立有正确理念和高分辨率精确数据为支撑的运动学和动力学模型。

3.6.4 逼近于实际的物理-数学模拟

(1) 多要素约束下的初始模型提取和物理模拟;

(2) 多要素约束下的初始模型提取和数学模拟;

(3) 与实际观测资料和研究结果的对比分析和辅助的解释;

(4) 集成分析与规律性认识。

3.6.5 青藏高原地球动力学及其形成与深化

(1) 大陆碰撞与高原隆升;

(2) 陆-陆碰撞的深层过程和动力学响应;

(3) 高原周边地域的成山、成盆、成灾和成矿;

(4) 壳、幔物质组成和深部物质与能量交换及运移。

4 地球内部物质运动的力源机制与综合研究

地球动力学是地球物理学领域里具有挑战性研究领域。尽管已有不少的地球动力学模型,但由于初始条件和边界条件的不唯一性制约,故仍备受争议(赵素涛等, 2008),如地球动力学的数字模拟;地球动力学数字模拟中的地幔动力学模型;双俯冲带模拟;地幔相变和地震间断面、转换带的物质属性;地震机制与破裂效应;地核结构、模型与组成;状态方程与地球内部非稳定性等(赵素涛等, 2008; AGU, 2007, 2008, 2009; Jackson *et al.*, 2007a, b; Peacock, 2001; Omori *et al.*, 2002; Dobson *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004; Green and Marone, 2002; Jacobs *et al.*, 2007; Hayman *et al.*, 2005; Belonoshko *et al.*, 2003; Dubrovinsky *et al.*, 2007; Nellis and Petach, 2007; Ding *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2004; Bercovici and Karato, 2003; Hirschmann, 2006; Karato, 2006; Jasbinsek and Dueker, 2007; Sakamaki *et al.*, 2006; Dasgupta and Hirschmann, 2006, 2007)。

基于上一节已经详细阐述了在我国地球动力学研究中的重要方向和任务,然而要在这五个方向取得成效或突破,则还必须加强基础性研究,而且必须将理念、观测、实验和物理-数字模型结合起来以取得逼近的认识。这是因为,在地球深部物质运动作用下,在地球上面有着多种形态和类型各异的构造展布,如成山、成盆、成岩、成矿、成灾,这就必须深化对地球本体的认识,因此对地球内部物质与能量的交换和其深层过程及动力学响应乃是当今地球动力学研究,以致整个地球物理研究中的核心所在。为此,对深层过程和力源机制的研究乃十分重要。

4.1 深部物质分异,调整和运移的物理属性及流变学

流变学在地球动力学研究中十分重要,它是研究地球组成岩石和矿物力学性质和变形行为的一个分支学科(Ranali, 1995; Roman and Smith, 2000; Zhong and Gurnis, 1996; 周永胜和何昌荣, 2004; 石耀霖和朱守彪, 2003; 傅容珊, 1993)。地球各圈层的构造变形归根到底乃是多矿物岩石的变形,因此要了解地球各圈层的变形及其形成,首先必须精细刻划壳、幔介质的精细结构,深刻理解多矿物复合岩石在各种物理条件(例如温度、围压、差应力、应变速率、应变方式等)下和化学环境(主要是氧逸度和水含量)中的流变学行为。大陆在构造挤压作用下如何成山、在拉张作用下如何成盆、成海? 为什么地球上老于200Ma的大洋岩石圈几乎全都已经俯冲到软流圈中去,而许多太古代(>2.5Ga)年龄的大

陆克拉通,其岩石圈厚度高达 200~400km,却还能一直漂曳在软流层之上?稳定的大陆克拉通在什么条件下会变得不稳定或破坏(即发生活化与岩石圈减薄)?Moho 界面是否为滑脱面?壳幔耦合及其在构造变形中的作用与随地质年代的演化?挤压造山带,如喜马拉雅山究竟能升多高?为什么在侧向静岩压力梯度作用下青藏高原深部地壳物质可呈大规模的流展,这种流动是否存在?它们运移的边界条件又是什么?高原隆起到什么高度才发生喜马拉雅山式的地壳挤出逃逸?地震“孕育”、发生和发展与震源深处介质破裂和破裂链如何形成、其破裂轨迹和成因机制是一幅什么样的逼近图像?第二深度空间(500~2000m)金属矿产资源形成和岩石基体与流体的运动行为?第二深度空间(500~1000m)油、气勘察和在双相沉积盆地,古老结晶基底和双机混合成因理念导向下绘出油、气形成、储积、运移及其深层动力过程?如何深化、量化深部壳、幔、核介质与结构的边界场,物理-力学属性,运动轨迹和力源机制?要回答这些当今地球动力学中一系列的重要问题,无不需要我们对地壳和地幔的介质和结构及其物理属性和行为有着较深刻的认识(许志琴等, 2008; 嵇少丞等, 2008)。为此:

(1)厘定和给出比较切合实际的深部物质运移的机理的模型,则必须加强复杂介质地球模型应用中初始和边界条件的限定,即在多要素约束下给出科学的和合理的初始条件和边界条件,并提取地球动力学模型。

(2)充分利用当代发展和成熟的高新科学技术,并通过高温、高压实验研究岩石的变形,通过精确研究上、中、下地壳和上地幔盖层中主要岩石的变形机理,物理-力学行为,以达正确认识不同地域、不同地层中介质的物理属性。不难理解,影响地壳和地幔岩石流变学性质的因素很多,包括温度、围压、应变和应变率、水含量、熔体含量、颗粒径、变形机制(位错蠕变、晶内扩散蠕变、超塑性等)、造岩矿物含量、氧逸度等,且尚难以界定和量化。

4.2 地球内部地幔对流

地表和地壳及地幔内部的物质运移与转换效应很可能与地幔、甚至核、幔热动力边界层密切相关,而板下全地幔热物质的运移和上涌乃是岩石圈板块运动的根本所在。为此,上、下地幔和核、幔边界在地球科学的研究中占有重要地位,因为它是促使地球内部物质与能量交换的一个热动力系统,而核-幔边界、D"层乃是热动力边界层,又是一个复杂的非线性系统。由于高精度数字地震观测系统的建立,地震层析成像技术的进步,使得人们对于地球内部逐渐有了一个较全的轮廓性的新认识;地球内部物质的复杂运动与驱动机制,特别是地壳和地幔的横向不均匀性和各向异性,即由地幔精细结构和横向不均匀性所呈现的地幔物质运移与其热动力学过程。为此人们可以利用这种深层过程和动力学响应去追溯、探索全球构造体系,特别是地幔构造演化的历史,从而深化对人类所居住的这个星球演化过程加深认识和理解。

近 20 多年来出现了不少的地幔结构和热动力学模型(傅容珊, 1993; Anderson, 1998),板片俯冲可达 300km(Su *et al.*, 1994; Zhang and Tanimoto, 1993)、600km,以致于 1300km 或更深(Bijward *et al.*, 1998)。应当承认它当必是一个非常复杂的系统,绝非理想的简单模式所能包含,但它却记录了地幔底辟和深部物质上升的历史。应当看到,核-幔边界、D"层以上的地幔对流乃是驱动板块运动,以致造成区域构造运动、地震和火山发生的重要源地(Schubert *et al.*, 2002),为此要深化研究和探索其形成的地球物理边界场响应、运动学轨迹和动力学过程。

4.2.1 地幔对流的物理模拟

物理模拟有着十分重要的作用(Loper, 1985),如垂直构造运动与水平构造运动的关系和物质运移的轨迹;上地幔中玄武岩浆的形成、运移、萃取与聚集;圈层耦合和解耦的深层动力学过程;成山、成盆、成岩、成矿和成灾的深层过程;660km 间断面做为化学界面能够阻止对流;地幔对流的行为、轨迹及其逼近模型(Monnereau and Quere, 2001; van der Hilst *et al.*, 1997)。

4.2.2 地幔对流的数学模拟

在给定边界条件下的数学模拟往往当必带有一定的先验性,但却在不断深化(Davies, 1989; Bercovici, 1993, 1996; Tackley, 1998a, b, 2000; 傅容珊等, 2005)。显然,地幔物质的混合,即地幔均匀化是地幔对流研究中不可回避的问题(傅容珊等, 2005; Schmalzl *et al.*, 1996; Ferrachat and Ricard, 1998)。早期研究认为:依照地球化学组分推测大洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)源于 660km 间断面的上、下地幔(Hoffmann and White, 1982; Hoffman and McKenzie 1985, Hoffmann, 1997; Gurnis and Davies, 1986)。显然,必须深入研究板块在地幔对流的驱动下,多尺度的地幔混合,3D 球域中现代地幔对流条件下的地幔混合效率。

4.2.3 地幔对流的实际观测和检验

由地震层析成像得出,俯冲板片介质可突破 660km 间断面并入深部地幔处,从而使得地幔对流结构成为超级的全球地幔对流。也有研究认为,即使是分层地幔对流,若下地幔黏滞性大于上地幔达 100 倍时,全地幔对流仍然能使下地幔保持地幔的原始状态(Gurnis and Davies, 1986)。这便表明,地幔混合效应是与地幔黏滞性的横向变化或原始地幔中高黏滞性密切相关。当今的问题是如何通过实验和计算求得较为准确的黏滞系数,乃是一个难题。

基于上述,自板块构造理论问世后,国际上在对地幔对流研究的基点上,理解板块运动、洋壳深部物质上涌和在陆缘地域的俯冲、消减,故多年来人们在跟踪,即以地幔对流来解释其运动的力源(傅承义, 1972; 嵇少丞等, 2008; 李昶和臧绍先, 2001; 傅容珊等, 2005; Gurnis and Davies, 1986; 黄建平, 2008; 刘丛强等, 2001),故地幔动力学研究一直是地球科学家们所关注的重要方向之一。尽管地幔对流可以解释很多地球科学中的现象,但也应当看到,它毕竟仍是一

个“猜想”, 这便表明, 当今的问题是一切地学模型都是建立在这一假设模型的基础之上 (Kellogg *et al.*, 1999), 即尚十分缺乏观测数据的检验。

尽管大量的地球物理观测、地震层析成像、地球化学等新的观测数据和大规模计算机数值模拟不断涌现出不同的模型或认识 (滕吉文, 1990b, 2006d; 滕吉文等, 1996a, 2006a; 许志琴, 2006; 张培震等, 2002; Burchfiel *et al.*, 2008; 陈运平等, 2008; 杜乐天等, 1996; Willoms *et al.*, 2006), 但解并不唯一, 所给定的模型中往往包括了许多未知数, 也只能是定性的解释。所以在地幔对流的研究中, 不能孤立地去仅研究地幔, 也不能孤立地研究地幔热动力系统中单一子系统的行为, 而要在深化研究地幔对流的过程中必须注意系统的概念 (傅容珊等, 2005; Willoms *et al.*, 2006; Alle'gre *et al.*, 1986; Christensen and Harder, 1991; Maruyama *et al.*, 2007), 在考虑各子系统的固有特征时, 尚必须顾及各子系统之间的耦合 (Kohlstedt *et al.*, 1995; O'Nions, 1987; Pysklywec and Beaumont, 2004; Pysklywec and Cruden, 2004)。在考虑统一驱动力系作用下, 决不可忽视不同驱动力源的作用。显然, 物理、数学模拟的前提必须有多要素的约束, 方能提取一个可能的近似模型, 因而确切地说系统的地球物理深部探测和地面高精度的观测, 高分辨数据的取得确是第一位的, 这就必须进行观测系统的设计和布局, 以先进观测体系的联合观测和综合分析乃是核心所在。

4.3 壳、幔介质的非均匀性和各向异性

通过地震观测的低速层证明: 地壳、地幔中均存在着低速层, 而且不论在纵向和横向分布都是不均匀的, 而且是各向异性的 (Hilley *et al.*, 2005)。这便表明, 介质的熔融和半熔融可以发生在地壳中, 也可以发生在地幔深处 (滕吉文, 2001a, 2003a, 2004)。地幔深处的熔融对俯冲下去的岩石圈物质通过地幔对流和来自核幔边界或 D" 层的地幔热柱上升是十分关键的。地幔热柱上升造成温、压条件的改变, 不仅会影响熔融体的黏度和物理化学性质、深层动力过程, 而且亦会改变岩浆的成分、矿物元素的分异、调整与岩浆矿床的形成, 以及地震和火山灾害的爆发。为此要深化以下几方面的研究:

(1) 精确测定和反演求取壳、幔介质中的各向异性、波速比和泊松比等参数, 因为它们能够反映挤压或剪切力系作用下介质与结构的变异及其物理状态;

(2) 深部壳、幔介质的熔融和半熔融 (或流体作用) 的理论、实验和观测三位一体的研究, 以取得比较确定性的认识。因为多相岩石部分熔融和其变形等过程、熔体的形成、聚积、运移及萃取是与不同类型应变 (等轴、非等轴、水平剪切) 相关, 而晶体的部分熔融和晶体之间的部分熔融确与变形密切相关;

(3) 下地壳拆沉和软流层地幔底侵作用、盆山耦合、陆内俯冲以及火山和地震“孕育”的介质与结构环境及物质属性;

(4) 各向异性对深部物质运移、构造变异和深层动力过程的约束;

(5) 介质的不均匀性、各向异性与资源、灾害和圈层耦合;

(6) 地幔热柱与地幔动力学和深部物质与能量的交换。

4.4 发展物理-数学模拟和高温高压实验研究

地球内部是一个复杂的高温高压系统, 即为由地表的常温常压, 连续地过渡到地核深处的极端高压环境。在经历了几十亿年的演化后, 则形成了当今的地球各圈层。深部介质 (含幔源包体及火山喷发携带物) 的物理化学性质和脆性、黏滞性、流变、熔融、相变、流体作用、状态方程、晶体结构和矿物相稳定性及成因研究。在众多要素约束下的地球介质结构、物质组成、运移和力系作用的物理—数学模拟, 以为地球物理边界场效应的综合解释提供力源作用的正演要素。

必须指出的是, 在数学-物理模拟中, 地球动力学方程的建立, 特别是如何在各要素约束下, 给出初始条件和边界条件, 并在适宜参数设定下提取初始模型乃是十分关键的, 否则将必会给出令人难以置信, 乃至错误的结果。在物理模拟中一定要严格锁定物理和动力相似, 选好可类比的材料, 制作好空间几何模型则是一个非常复杂的过程。当然, 它们也只能给出一个轮廓性的结果, 对深化认识物质运动的运动学和动力学响应取得一逼近的认识, 起到对实际观测结果的一种解释、即辅助效应。

大陆科学钻探是直接检测与获取深部介质结构和资源、灾害背景的唯一手段, 同时也能对地球动力学过程的物理-数学模拟和高温高压实验提供良好的约束与界定, 但其深度毕竟是有限的 (当今世界上最深的超深钻井也只有 12.262km)。为此应通过下列实验手段来研究:

(1) 常温、常压和高温、高压条件下岩石和矿物的物理常数测定, 目的是以厘定各类岩石和矿物在不同构造地区, 在不同深度处的物理属性 (包括非均匀性与各向异性), 并用于地球物理场和地球化学场的反演, 以探索其形成与演化的深层过程。

(2) 试图给出或近似地给出在地球动力学研究中, 所需进行数学模拟的初始条件和边界条件, 以利用对初始模型的约束, 逐步减少理想化模型和假设参数所导致的结果的多解性。

(3) 研究物理参数、力学参数 (含流变参数)、化学组分参数之间的定量关系与相互转换关系以及方程的建立。

(4) 一维、二维、三维物理模型的建立和地球物理场及地幔对流模型试验。

(5) 壳、幔结构中的低速层、层间耦合和解耦、热效应和变形机制。

(6) 成山、成盆、成岩、成矿和成灾的深层过程和耦合响应。

这里必须特别强调的是, 在物理、数字模拟中, 必须要基

于精确的物理-几何相似,实际的介质和结构与物理-力学参数的选取,方能取得具有参考价值的,且逼近于实际的分析和探讨。

4.5 高新技术的应用和新物理量的探索

20世纪80年代以来,随着高新技术的飞速发展,对地球动力学来说,一个以迅速开展高科技应用和高技术产业为特征的时代已经来临,如今这些高新技术已经或正在逐步渗透到地球动力学研究的各个分支学科。高精度的地球物理场观测使地球动力学研究获得了前所未有的大量新信息,从而正在引起世界地球动力学与技术领域的新变革。人们应当充分认识到,高科技及其产业化将是今后地球动力学得到升华的一种制胜手段,是人们向海洋、向空间与球外星系和地球深部“挺进”和揭示其形成与演化动力机制的必然保证。

4.5.1 科学、技术和新方法的引进与应用

这样不仅使整个地球动力学的研究工作获得第一手高分辨资料,且其效率大为提高,为认识和解释地球内部问题提供了更为坚实的基础。显见一个学科领域的科学理论萌芽和诞生通常却直接与科学技术和新方法的应用及新信息的取得息息相关。一些新技术、新方法的产生和应用往往可以改变本学科的整体发展方向和进程。80年代在岩石圈物理与动力学领域中出现了一大批新技术、新方法、新认识和新理论,它们已影响了20世纪末叶的科学发展,其中最重要的是:全球定位系统(GPS),陆地卫星,大动态、宽频带、数字化的可移动地震台网与台阵(包括大、小孔径),高精度地震宽角反射和折射,地震反射(COCORP)技术,几千道乃至万道的数字地震石油勘探仪器的应用,地震三维速度结构与地震成像技术(包括井间),各种高精度地球物理勘探仪器,可移动式红外光谱仪,航空重力场、磁力场和梯度测量,矢量程序设计计算机(巨型计算机)以及对数学和物理学中所获新成就的应用等(滕吉文等,1997;滕吉文,2003b,2006a,b,2007a,2008,2009;朱光明等,2008;卢占武等,2006;郑洪伟等,2006)。

4.5.2 新技术、新方法和新仪器制约着地球动力学的发展

当今人们必须清晰地认识到,一种新技术、一种新方法、一种新仪器和实验设备的问世均会为自然科学的探索与发现开辟一个新的窗口,不仅可以观测到和发现很多新现象、取得新的信息或新的物理量,而且往往会是新理念或新理论的诞生,导致一个新领域的开辟!

随着这些观测技术和测试与分析技术、新方法的运用,在本科学领域已逐渐形成了相互配套和互补的四大科学技术体系;即地球物理观测技术、资源探测技术、物理模拟实验技术和计算与信息处理技术体系。这四大技术体系的形成和进一步发展,标志着对地球动力学的深部探测、观测、实验、数据处理等研究的技术装备和手段已进入现代化阶段。进而表明,地球动力学在资源、能源和灾害勘查与深层动力过程研究中正在进入一个新的历史时期。

还要指出,地球动力学从宏观到微观,从定性到定量,从浅部到深部,从大陆到海洋,从地球内部到球外空间发展的宏伟实践,也向科学技术提出了新的要求,提供了新的机遇,已经,并将继续推动科学技术的新进步和新发展,并用来为人类服务。

4.6 高层次的综合研究是逼近于对某一科学前沿问题新认识的起点

4.6.1 集成效应与新认识的体现

地球动力学的发展历史表明,它在不同的历史发展阶段必会呈现出新的萌芽或新的思维,故必有着不同的研究重点。而研究重点的更替或转移应是地球动力学不断进步和步入创新境界的标志。地震走时表的创立,为深化认识地球内部和本体打下了坚实的基础。地球物理场与岩石圈结构,海洋考察,地震机制与预测,行星际探索,航空与航天探测等均已揭示了本门科学的新领域。板块构造学说的诞生宣告了地球动力学在地球科学发展中的重要地位。以活动论为内涵的全球大地构造学说(基于浅层和深层过程及其耦合响应,即已不是传统的大地构造学说)仍是当今地球科学发展的导向。然而必须认识到,板块运动的力源问题,即其对地球内部和动力机制的探索尚待深入。因此地球物理学家必须承担起这一重任,深入研究地球内部各圈层的耦合、物质与能量交换及其深层动力过程,以及它们与成山、成盆、成岩、成矿和成灾之间的制约和动力机制。通过高层次的综合研究,并要在理论、观测和实验三位一体的研究中取得突破性进展。为此,必须将地球作为一个系统和整体,研究地球内部,特别是地壳与上地幔的结构、物质组成和地球内部各圈层的介质结构与物质组成之间的耦合、核-幔边界起伏与地幔对流以及力源机制,并研究物理及化学和生物作用过程以及它们之间的相互关系。

以上论述问题均为起点高、难度大,需要高水平的综合研究和有机地集成方能奏效。因此科学意义、目标和应用前景明显,则是逼近于共识的前沿基础研究。

4.6.2 地球动力学研究的核心问题

地球动力学的核心问题是研究地球内部各圈层能量、质量的传输和交换过程,地球动力学的研究对全球尺度的地震、火山、构造运动建立了合理的模型,对于地球内部物质的运动和循环也提出了较为合理的模型。21世纪将必会是地球动力学将会得到更大的发展(赵素涛等,2008; British Geological Survey Natural Environment Research Council, 2004)。对于大陆岩石圈的演化、地球各圈层的相互作用、核幔边界的能量和质量耦合、下地幔和核幔边界物质的属性研究都将会取得重大的进展。随着社会对能源、资源需求的增长,以及对于人类生存环境的要求,围绕经济学和社会学开展地球动力学研究将必是一个新的方向,利用现有的和可能的新发展拓宽地球动力学的研究视野,在基础和应用研究中共进乃是必然的方向和任务。要研究岩浆的运移过程,探索金属矿

床的深部成因,研究地壳中应力变化与地震发生频率的密切相关性。利用地震发生频率来计算应力变化,估计应力的空间分布,寻找地震发生深处的应力变化集中区,可以以此作为地震预测的基础。火山爆发也是地球动力学最典型的一种动力学现象,它所引发的海啸乃是近年来的热门课题。地球动力学如果在这些领域的研究中有所突破,一定限度地挽救人民的生命和财产将会是相当可观,减少的社会经济冲击也会相当之大,这是完全符合以最少成本取得最大效益经济学原理的。地球动力学研究本身是属于基础研究的范畴,它的主要目的是要了解 and 认识地球内部的物理-力学过程,但同时地球动力学研究的成果对于改造世界,为社会建设服务也一定要起到重要作用。新的技术的应用和社会对环境和能源日益增大的需求,为地球动力学的发展提供了一个很好的契机。因此,可以预计,高分辨信息的获取,详细理解深部物质的分异、调整,物质与能量的交换,深层过程和力源机制,即深化对地球本体的认识乃是 21 世纪地球动力学能否取得突破性进展的关键所在。

5 结语

当前,地球动力学研究正处正 21 世纪全球地球科学领域发展的关键历史时期,并提出了许多前沿性科学研究领域,即对国家战略需求和创新提出了一系列的方向、任务和必须研究和探索的领域。随着时代的进步,研究的深化和高分辨率信息的积累,21 世纪不仅会出现许多崭新的研究成果,而且必然会形成一系列新的科学思维、理论、方法和概念。显然,只有强化研究地球深部地壳、地幔乃至地核内部物质和能量的交换,物质的重新分异和调整及运移,即在深化认识地球本体的基点上,方能对成山、成盆、成岩、成矿和成灾给出深层过程和动力学机制上的新理念。为此,在造福于人类的征途上,一定会遵循国家的战略需求,为科学与技术的创新,社会与经济的持续发展,为人类营造一个良好的生活与生存空间,并在保护地球环境与“净化”人类生存空间作出更加辉煌的贡献,并造福于人类!

References

AGU. 2007. AGU Fall Meeting 2007. San Francisco, CA, USA, 2007
 AGU. 2008. AGU Fall Meeting 2008. San Francisco, CA, USA, 2008
 AGU. 2009. AGU Fall Meeting 2009. San Francisco, CA, USA, 2009
 Alle'gre CJ, Staudacher T and Sarda P. 1986. Rare gas systematics: Formation of the atmosphere, evolution and structure of the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 81: 127-150
 Anderson DL. 1998. The scales of mantle convection. *Tectonophysics*, 284: 1-17
 Belonoshko AB, Ahuja R and Johansson B. 2003. Stability of the body-centred-cubic phase of iron in the Earth's inner core. *Nature*, 424 (4): 1032-1034
 Bercovici D. 1993. A simple model of plate generation from mantle flow. *Geophys. J. Int.*, 114: 635-650

Bercovici D. 1996. Plate generation in a simple model of lithosphere-mantle flow with dynamic self-lubrication. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144: 41-51
 Bercovici D and Karato SI. 2003. Whole-mantle convection and the transition-zone water filter. *Nature*, 425: 39-44
 Bijward H, Spakman W and Engdahl ER. 1998. Closing the gap between regional and global travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 103 (B12): 30055-30078
 British Geological Survey Natural Environment Research Council. 2004. The British geological survey strategic science programme 2005-2010
 Burchfiel BC, Royden LH, van der Hilst RD and Hager BH. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GAS Today*, 18 (7): 4-11
 Busby CD and Ingerso RV. 2005. *Tectonics of Sedimentary of Basins*. Blackwell Science Inc. Cambridge, Massachusetts, 578
 Chen YP, Zhao CB and Lin G. 2008. Mechanical properties of deep Earth rocks and their roles in the investigation of continental deformation processes. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 276-284 (in Chinese with English abstract)
 Chen YT. 2007. Earthquake prediction: Progress, difficulties and prospect. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 28(2): 1-24 (in Chinese with English abstract)
 Christensen U and Harder H. 1991. 3D convection with variable viscosity. *Geophys. J. Int.*, 104: 213-226
 Dasgupta R and Hirschmann MM. 2006. Melting in the Earth's deep upper mantle caused by carbon dioxide. *Nature*, 440: 659-662
 Dasgupta R and Hirschmann MM. 2007. Effect of variable carbonate concentration on the solidus of mantle peridotite. *Am. Mineral.*, 92 (2-3): 370-379
 Davies GF. 1989. Mantle convection model with a dynamic plate: Topography, heat flow and gravity anomalies. *Geophys. J. Int.*, 98: 461-464
 Dewey JF. 2005. Orogeny can be very short. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 107: 15286-15293
 Dickinson WR. 1993. Basin geodynamics. *Basin Res.*, 5: 195-196
 Ding Y, Ahuja R, Shu J, Chow P, Luo W and Mao H. 2007. Structural phase transition of vanadium at 69GPa. *Phys. Rev. Lett.*, 98 (8): 085502
 Dobson D, Meredith PG and Boon SA. 2002. Simulation of subduction zone seismicity by dehydration of serpentinite. *Science*, 298: 1407-1410
 Du LT, Liu RX, Deng JF *et al.* 1996. *Geochemistry of Mantle Fluid and Asthenosphere*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
 Dubrovinsky L, Dubrovinskaia N, Narygina O, Kantor I, Kuznetsov A, Prakapenka VB, Vitos L, Johansson B, Mikhaylushkin AS, Simak SI and Abrikosov IA. 2007. Body-centred cubic iron-nickel alloy in Earth's core. *Science*, 316: 1880-1883
 Ferrachat S and Ricard Y. 1998. Regular vs. chaotic mantle mixing. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 155: 75-86
 Fu CY. 1972. *Continental Drift, Sea Floor Spreading and Plate Tectonics*. Beijing: Science Press (in Chinese)
 Fu RS. 1993. Thermal dynamical model of the mantle. *Prog. Geophys.*, 8(2): 13-26 (in Chinese with English abstract)
 Fu RS, Leng W and Chang XH. 2005. Advancements in the study of mantle convection and the material movements in the deep Earth interior. *Prog. Geophys.*, 20(1): 170-179 (in Chinese with English abstract)
 Green HW II and Marone C. 2002. Instability of deformation. *Rev. Mineral. Geochem.*, 51(1): 181-199
 Gurnis M and Davies GF. 1986. The effect of depth-dependent viscosity on convective mixing in the mantle and the possible survival of primitive mantle. *Geophys. Res. Lett.*, 13: 541-544

- Hayman P, Kopylova M and Kaminsky F. 2005. Lower mantle diamonds from Rio Soriso (Juina area, Mato-Grosso, Brazil). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 149(4): 430–445
- Hilley GE, Burgmann R, Zhang PZ and Molnar P. 2005. Bayesian inference of plastosphere viscosities near the Kunlun Fault, northern Tibet. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01302, doi: 01310.01029/02004GL021658
- Hirschmann MM. 2006. Water, melting, and the deep earth H₂O cycle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34(1): 629–653
- Hoffman NRA and McKenzie DP. 1985. The destruction of geochemical heterogeneities by differential fluid motions during mantle convection. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 82: 163–206
- Hoffmann AW and White WM. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 57: 421–436
- Hoffmann AW. 1997. Mantle geochemistry the message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219–229
- Huang JP, Fu RS, Zheng Y, Xue TJ, Liu X and Han LB. 2008. The influence of mantle convection to the lithosphere deformation of China mainland. *Chinese J. Geophys.*, 51(4): 1048–1057 (in Chinese with English abstract)
- Hyndman RD, Currie CA and Mazzotti SP. 2005. Subduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat. *GSA Today*, 15(2): 4–10
- Jackson JM, Sinogeikin SV, Carpenter MA and Bass JD. 2007a. Novel phase transition in orthoenstatite. *Am. Mineral.*, 89(1): 239–245
- Jackson JM, Sinogeikin SV and Bass JD. 2007b. Sound velocities and single-crystal elasticity of orthoenstatite to 1073K at ambient pressure. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 161(1–2): 1–12
- Jacobs MHG and de Jong BHWS. 2007. Placing constraints on phase equilibria and thermophysical properties in the system MgO-SiO₂ by a thermodynamically consistent vibrational method. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71(14): 3630–3655
- Jasbinsek J and Dueker K. 2007. Ubiquitous low-velocity layer atop the 410km discontinuity in the northern Rocky Mountains. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 8(10): Q10004
- Ji SC, Zhong DL, Xu ZQ and Xin B. 2008. Rheology: A new departure in structural geology and geodynamics. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 257–264 (in Chinese with English abstract)
- Karato S. 2006. Remote sensing of hydrogen in Earth's mantle. *Rev. Mineral. Geochem.*, 62: 343–375
- Kellogg BL, Hager HH and van der Hilst RD. 1999. Stratification in the deep mantle. *Science*, 283: 1881–1884
- Kohlstedt DL, Evans B and Mackwell SJ. 1995. Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments. *J. Geophys. Res.*, 100: 17587–17602
- Lee B, Rvdd RE, Klepeis JE, Soderlind P and Landa A. 2007. Theoretical confirmation of a high-pressure rhombohedral phase in vanadium metal. *Phys. Rev. Ser. B*, 75(48): 180101R
- Li C and Zang SX. 2001. Rheology of lithosphere: Studying status and remained problems. *Prog. Geophys.*, 16(2): 99–108 (in Chinese with English abstract)
- Link PK, Mahoney JB and Fanning MC. 2005. Isotopic Determination of Sediment Provenance: Techniques and Applications. *Sediment. Geol.*, 182: 1–2
- Liu CQ, Huang ZL, Li HP and Su GL. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes. *Earth Sci. Front.*, 8(4): 231–241 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Wang LS and Li C. 2007. Rheology of continental lithosphere: An rreview. *Prog. Geophys.*, 22(4): 1209–1214 (in Chinese with English abstract)
- Loper DE. 1985. A simple model of whole-mantle convection. *J. Geophys. Res.*, 90: 1809–1836
- Lu ZW, Gao R, Li QS, Guan Y, He RZ and Huang LY. 2006. Deep geophysical probe and geodynamic study on the Qinghai-Tibet Plateau (1958~2004). *Chinese J. Geophys.*, 49(3): 753–770 (in Chinese with English abstract)
- Maruyama S, Santosh M and Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary. *Gondwana Res.*, 11: 7–37
- McCann T, Saintot A, Chalot-Prat F, Kitchka A, Fokin P and Alekseev A. 2003. Evolution of the southern margin of the Donbas (Ukraine) from Devonian to Early Carboniferous times. In: Mccann T and Saintot A (eds.). *Tracing Tectonic Deformation Using the Sedimentary Record*. Geological Society, London, Special Publications. 208: 117–135
- Monnereau M and Quere S. 2001. Spherical shell models of mantle convection with tectonic plates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 84: 575–587
- Moore EM and Twiss RJ. 1995. *Tectonics*. New York: WH Freeman and Company, 130–154
- Nellis WJ and Petach T. 2007. Systematics of compression of hard materials. *Shock Compression of Condensed Matter*, 955(1): 89–92
- O' Nions RK. 1987. Relationships between chemical and convective layering in the Earth. *J. Geol. Soc. London*, 144: 259–274
- Omori S, Kamiya S, Maruyama S and Zhao D. 2002. Morphology of the intraslab seismic zone and devolatilization phase equilibria of the subducting slab peridotite. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 76(4): 455–478
- Peacock SM. 2001. Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducting oceanic mantle? *Geology*, 29(4): 299–302
- Pysklywec RN and Beaumont C. 2004. Intraplate tectonics: Feedback between radioactive thermal weakening and crustal deformation driven by mantle lithosphere instabilities. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 221: 275–292
- Pysklywec RN and Cruden AR. 2004. Coupled crust mantle dynamics and intraplate tectonics: Two-dimensional numerical and three-dimensional analogue modeling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5: Q10003, doi: 10.1029/2004GC000748
- Ranali G. 1995. *Rheology of the Earth*. Second Edition. New York: Chapman and Hall
- Report Writing Committee. 1993. A National Program for Research in Continental Dynamics. CD/2020. The IRIS Consortium
- Roman L and Smith HJ. 2000. The terrestrial web. *Science*, 288: 1983
- Sakamaki T, Suzuki A and Ohtani E. 2006. Stability of hydrous melt at the base of the Earth's upper mantle. *Nature*, 439: 192–194
- Schmalz J, Houseman GA and Hansen U. 1996. Mixing in vigorous, time-dependent 3D convection and application to the Earth's mantle. *J. Geophys. Res.*, 101(B10): 21847–21858
- Schubert G, Turcotte DL and Olson P. 2002. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. New York: Cambridge Univ Press,
- Shi YL and Zhu SB. 2003. Contrast of rheology in the crust and mantle near Moho revealed by depth variation of earthquake mechanism in continental China. *Chinese J. Geophys.*, 46(3): 359–365 (in Chinese with English abstract)
- Song TRA, Helmberger DV and Grand SP. 2004. Low-velocity zone atop the 410km seismic discontinuity in northwestern Unites States. *Nature*, 427: 530–533
- Su W, Woodward RL and Dziewonski AM. 1994. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. *J. Geophys. Res.*, 99: 6945–6980
- Tackley PJ. 1998a. In The Core-Mantle Boundary Region. In: Gurnis ME, Wyession E, Knittle BA and Buffett (eds.). *American Geophysical Union*, Washington, DC, 231–253
- Tackley PJ. 1998b. Self-consistent generation of tectonic plate in three-dimensional mantle convection. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 157: 9–22

- Tackley PJ. 2000. Mantle Convection and Plate Tectonics: Toward an Integrated Physical and Chemical Theory. *Science*, 288: 2002 – 2007
- Teng JW, Kan YJ, Liu TH and Zeng RS. 1973. Refracted and reflected waves from the crystalline basement in the eastern part of Chaidam basin. *Chinese J. Geophys.*, 16(1): 62 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 1974. Deep reflected waves and the structure of the earth crust of the eastern part of Chaidam basin. *Chinese J. Geophys.*, 17(2): 122 – 136 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Feng ZF, Li JS, Chen XB, Wen KD, Zhang JR and Xiong CJ. 1974. Crustal structure of the central part of the North China Plain and the Hsingtai earthquake (I). *Acta Geophys. Sinica*, 1974, 17(4): 255 – 271 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Wang GC, Lin DH, Xing JR, Liang WD and Xu SL. 1975. Crustal structure of the Central part of the North China Plain and the Hsingtai earthquake (II). *Acta Geophys. Sinica*, 1975, 18(3): 196 – 207 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 1981. Characteristics of geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau and its neighbouring regions, geological and ecological studies of Qinghai Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1: 633 – 650
- Teng JW, Wei SY, Li JS and Zhao JX. 1982. Structure of the upper mantle and low velocity layer of the upper mantle of the Hsingtai earthquake region on the North China Plain. *Acta Geophys. Sinica*, 1982, 25(1): 58 – 64 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Wang QS, Liu YL and Wei SY. 1983. The characteristics of geophysical field and the distribution and formation of oil and gas bearing basin in eastern China. *Chinese J. Geophys.*, 26(4): 319 – 330 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 1990a. The main achievement and new trend for lithosphere physics and dynamics: Discussion of development strategy for lithosphere physics of China. *Sci. techol.*, 4: 35 – 48 (in Chinese)
- Teng JW. 1990b. The structure of crust and upper mantle and formation of huge thick crust in Qinghai-Xizang plateau China. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(4): 333 – 338 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 1993. Advance and developing direction in research of lithospheric physics and dynamics. *Prog. Geophys.*, 8(3): 45 – 63 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Liu FT, Jin YL *et al.* 1994. Seismic tomography in the crust and mantle for the orogenic belt and sedimentary basin in Northwest China. In: *Progress in Chinese Solid Geophysics*. Beijing: China Ocean Press, 66 – 80 (in Chinese)
- Teng JW. 1995. Structure of spheres and layers in earth's depth and geodynamics. In: *Earth Sciences into the 21st Century*. Zhengzhou: Science and Technology Press of Henan, 208 – 209 (in Chinese)
- Teng JW, Hu JF, Zhang ZJ, Wang AW, Sun XL, Yang ZS, Yang DH and Wan ZC. 1995. Rayleigh wave dispersion and three-dimensional velocity structure in the continent and its margin of northwestern China. *Chinese J. Geophys.*, 38(6): 737 – 749 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Zhang ZJ, Hu JF, Yin ZX, Liu HB, Wan ZC, Yang DH, Zhang BM and Zhang H. 1996a. Physical mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 307 – 323 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Zhang ZJ, Wan ZC, Yang DH and Zhang H. 1996b. The preliminary study of geophysical field and deep structural background of oil and gas for Qiangtang basin and its neighbouring regions. *Prog. Geophys.*, 11(1): 12 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Zhang BM, Hu JF and Wen YB. 1997. Deep media and tectonic environment for earthquake "pregnancy". In: Chen YT (ed.). *Development of Seismology in China: Congratulations for the 80th Birthday of Prof. Xie Yushou*. Beijing: Seismologica Press, 258 – 265 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 1999. The suggestions for the comprehensive research and evaluation of the future prospect in Daqing Oilfield. *Science and Technology Review*, (3, 4): 17 – 19 (in Chinese)
- Teng JW, Zhang ZJ, Wang GJ, Liu HB, Hu JF, Zhang BM, Chen Y and Zhang H. 1999. The deep internal dynamical processes and new model of continental-continental collision in Himalayan collision orogenic zone. *Chinese J. Geophys.*, 42(4): 481 – 494 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Zhang ZJ, Wang GJ and Wang TN. 2000a. The seismic anisotropy and geodynamics of earth's interior media. *Prog. Geophys.*, 15(4): 1 – 35 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW and Zhang ZJ. 2000b. The seismic anisotropy and geodynamics of earth's interior media. *Prog. Geophys.*, 15(1): 7 – 35 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2001a. The exchange of substance and energy different sphere coupling and deep dynamical process within the earth. *Earth Sci. Front.*, 8(3): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2001b. 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, Taipei, 151 – 153 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2003a. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the earth and formation of mineral resources. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(1): 3 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2003b. Great achievements in Geophysics in the 20th century and developing frontiers for the 21st century. *Earth Sci. Front.*, 10(1): 117 – 140 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Zhang ZJ, Bai WM *et al.* 2004. *Physics of Lithosphere*. Beijing: Science Press, (in Chinese)
- Teng JW. 2004. The opportunity and challenge of geophysics in the 21st century. *The Sciences Developing Reports of Chinese Academy of Sciences in 2004*. Beijing: Science Press, 16 – 22 (in Chinese)
- Teng JW. 2005. The Exchange of Substance and energy and dynamic process in the earth interior. *The 100 Crossing-subject Problems in 21st Century*. Beijing: Science Press, 327 – 344 (in Chinese)
- Teng JW. 2006a. Where are the contemporary geophysics of China going? *Prog. Geophys.*, 21(2): 327 – 339 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2006b. Some important scientific problems and ponders on lithospheric physics research of China at the present time. *Prog. Geophys.*, 21(4): 1033 – 1042 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2006c. Strengthen develop geophysical discover ore, exploration and exploitation of metal mineral resources in second deep space of the crustal interior. *Geol. Bull. China*, 25(7): 767 – 771 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2006d. Geophysical research on the Qinghai-Tibetan Plateau and discussion on some related problems. *Earth Sci. Front.*, 13(3): 19 – 22 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Yan YF, Wang GJ and Xiong X. 2006a. 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.*, 49(2): 449 – 457 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Wang QS, Wang GJ, Xu Y and Zhang XM. 2006b. Specific gravity field and deep crustal structure of the Himalayas east structural knot. *Chinese J. Geophys.*, 49(4): 1045 – 1052 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2007a. The developmental opportunity and challenge of geophysics in the present age in China. *Prog. Geophys.*, 22(4): 1101 – 1112 (in Chinese with English abstract)

- Teng JW. 2007b. Development prospect and independent innovation of petroleum geophysical prospecting in China. *Geophys. Prospect. Petrol.*, 46(3): 213–225 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Yang LQ, Rao JJ, Liu HC, Liu C, Han LG and Zhang XM. 2007a. Deep discover ore exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation. *Prog. Geophys.*, 22(2): 317–334 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Liu JM, Liu C, Yao JJ, Han LG and Zhang YQ. 2007b. Prospecting for metal ore deposits in second deep space of crustal interior, the building of strategic reserve base of northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science edition)*, 37(4): 637–651 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2008. The core scientific problems and development direction for the contemporary geophysical research. *Prog. Geophys.*, 23(3): 637–640 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Tian Y, Liu C and Han LG. 2008a. Dual-phase sedimentary basin and old crystalline basement in China and deep Oil and Gas reservoirs in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(4): 527–552 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Zhang XM and Yang H. 2008b. Exploration and exploitation in second deep space of crust interior and high efficient utilization of the major energy-coal resource in China. *Prog. Geophys.*, 23(1): 972–992 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Bai DH, Yang H, Yan YF, Zhang HS, Zhang YQ and Ruan XM. 2008c. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan Ms 8.0 earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1–28 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2009. The research of deep physics of Earth's interior and dynamics in China: The sixteen major thesis evidences and scientific guide. *Prog. Geophys.*, 24(3): 801–829 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Yao JJ, Jiang CZ, Yan YF, Yang H, Zhang YQ and Ruan XM. 2009a. Magmatic rock mass and information for large and superlarge mineral deposits and its ore-prospecting effect in deep crust. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1009–1038 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Yang LQ, Liu HC, Yan YF, Yang H, Zhang HS, Zhang YQ and Tian Y. 2009b. Geodynamical responses for formation and concentration of metallic minerals in the second deep space of lithosphere. *Chinese J. Geophys.*, 52(7): 1734–1756 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Ruan XM, Zhang YQ and Yan YF. 2009c. Theoretical concept for sedimentary basin, crystalline basement and the origin of oil and gas and its exploration and exploitation in the second deep space. *Chinese J. Geophys.*, 52(11): 2798–2817 (in Chinese with English abstract)
- Teng Y. 2008. Must combine track for study the anticipated earthquake and earthquake protective measure; Visit the member of National Committee of Wenchuan Seismic Specialists, Academician of the Academy of Science, Teng JW. *The Geological exploration Herald*, May, 29, 2008, the fourth block (in Chinese)
- van der Hilst RD, Widiyantoro S and Engdahl ER. 1997. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 386: 578–584
- Wang EQ, Burchfiel BC and Ji JQ. 2001. Evidence and estimation of Cenozoic crustal shortening across the eastern Himalaya syntaxis. *Sci. China (Ser. D)*, 31(1): 1–9 (in Chinese)
- Wang QS, Teng JW, Wang GJ and Xu Y. 2005. The region gravity and magnetic anomaly fields and the deep structure in Yinshan Mountains of Inner Mongolia. *Chinese J. Geophys.*, 48(2): 314–320 (in Chinese with English abstract)
- Willoams PF, Jiang D and Lin S. 2006. Interpretation of deformation fabrics of infrastructure zone rocks in the context of channel flow and other tectonic models. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). *Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones*. Geological Society, London, Special Publications, 268: 221–235
- Xu ZQ, Yang JS, Liang FH, Qi XX, Liu FL, Zeng LS, Liu DY, Li HB, Wu CL, Shi RD and Chen SY. 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya rerrane; Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ. 2006. *The Continental Dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau (1984~2006)*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xu ZQ, Li TD, Yang JS, Ji SC, Wang ZQ and Zhang ZM. 2008. Advances and perspectives of Continental dynamics: Theory and application. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1433–1444 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JF, Green HW II, Bozhilov K and Jin ZM. 2004. Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust. *Nature*, 428:633–636
- Zhang PZ, Wang QM and Ma ZJ. 2002. GPS velocity and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Sci. Front.*, 9(2): 442–450 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Y and Tanimoto T. 1993. High-resolution global upper mantle structure and plate tectonics. *J. Geophys Res.*, 98: 9793–9823
- Zhao ST and Jin ZM. 2008. New advances in the study of the Earth's deep interior—a glance of the American Geophysical Union Fall Meeting in 2007. *Earth Sci. Front.*, 15(5): 298–316 (in Chinese with English abstract)
- Zhao WJ. 2007. Advances in continental dynamics research in China: Commemorating the 60th anniversary of the founding of the Chinese geophysical society. *Prog. Geophys.*, 22(4): 1113–1121 (in Chinese with English abstract)
- Zheng HW, Li TD, Gao R and He RZ. 2006. The advance of numerical simulation in geodynamics. *Prog. Geophys.*, 21(2): 360–369 (in Chinese with English abstract)
- Zhong S and Gurnis M. 1996. Interaction of weak faults and non-Newtonian rheology produces plate tectonics in a 3D model of mantle flow. *Nature*, 383: 245–247
- Zhou YS and He CR. 2004. The status of continental lithosphere rheology and experiments on creep of rocks at high temperature and high pressure. *Prog. Geophys.*, 19(2): 246–254 (in Chinese with English abstract)
- Zhu GM, Yang WC, Yang ZH, Du YC, Yang GM, Yao H, Yang ZJ and Cheng ZY. 2008. Vertical seismic profiling at the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese J. Geophys.*, 51(2): 479–490 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈运平, 赵崇斌, 林舸. 2008. 深部岩石力学性质及其在大陆构造变形过程中的作用. *大地构造与成矿学*, 32(3): 276–284
- 陈运泰. 2007. 地震预测——进展、困难与前景. *地震地磁观测与研究*, 28(2): 1–24
- 杜乐天, 刘若新, 邓晋福等. 1996. *地幔流体与软流层(体)地球化学*. 北京: 地质出版社
- 傅承义. 1972. *大陆漂移, 海底扩张和板块构造*. 北京: 科学出版社
- 傅容珊. 1993. 地幔热动力学模型. *地球物理学进展*, 8(2): 13–26
- 傅容珊, 冷伟, 常筱华. 2005. 地幔对流与深部物质运移研究的新进展. *地球物理学进展*, 20(1): 170–179
- 黄建平, 傅容珊, 郑勇, 薛霆境, 刘峡, 韩立波. 2008. 地幔对流拖曳力对中国大陆岩石层变形的影响. *地球物理学报*, 51(4): 1048–1057

- 稽少丞,钟大赉,许志琴,夏斌. 2008. 流变学:构造地质学和地球动力学的支柱学科. 大地构造与成矿学,32(3):257-264
- 李昶,臧绍先. 2001. 岩石层流变学的研究现状及存在问题. 地球物理学进展,16(2):99-108
- 刘丛强,黄智龙,李和平,苏根利. 2001. 地幔流体及其成矿作用. 地学前缘,8(4):231-241
- 刘绍文,王良书,李成. 2007. 大陆岩石圈流变学研究进展. 地球物理学进展,22(4):1209-1214
- 卢占武,高锐,李秋生,管焯,张季生,贺日政,黄立言. 2006. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958~2004). 地球物理学报,49(3):753-770
- 石耀霖,朱守彪. 2003. 中国大陆震源机制深度变化反映的地壳-地幔流变特征. 地球物理学报,46(3):359-365
- 滕吉文,阚荣举,刘道洪,曾融生. 1973. 柴达木东盆地的基岩首波和反射波. 地球物理学报,16(1):62-76
- 滕吉文. 1974. 柴达木东盆地的深层反射波和地壳构造. 地球物理学报,17(2):122-136
- 滕吉文,冯焄芬,李金森,陈学波,闻昆娣,张家茹,熊成君. 1974. 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,17(4):255-272
- 滕吉文,王国正,刘道洪,邢纪润,梁文斗,徐世林. 1975. 华北平原中部地区深层构造背景及邢台地震(二). 地球物理学报,18(3):196-207
- 滕吉文,魏斯禹,李金森,赵静娴. 1982. 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,25(1):58-64
- 滕吉文,王谦身,刘元龙,魏期禹. 1983. 中国东部地区地球物理场特征与含油气盆地的分布和形成. 地球物理学报,26(4):319-330
- 滕吉文. 1990a. 论当代岩石圈物理与动力学研究的主要成就和新动向,中国岩石圈研究进展与发展战略讨论. 科技导报,4:35-48
- 滕吉文. 1990b. 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,14(4):333-338
- 滕吉文. 1993. 岩石圈物理与动力学研究与发展方向. 地球物理学进展,8(3):45-63
- 滕吉文,刘福田,金幼黎等. 1994. 中国西北造山带与沉积盆地地区的地壳和地幔的地震层析成像. 中国地球物理学进展,北京:海洋出版社,66-80
- 滕吉文. 1995. 地球深部圈层与动力学. 见:走向21世纪的中国地球科学. 郑州:河南科学技术出版社,208-209
- 滕吉文,胡家富,张中杰,王爱武,孙小丽,杨占寿,杨顶辉,万志超. 1995. 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,38(6):737-749
- 滕吉文,张中杰,胡家富,尹周勋,刘宏宾,万志超,杨顶辉,张秉铭,张慧. 1996a. 青藏高原整体隆升与地壳短缩增厚的物理力学机制研究(下). 高校地质学报,2(3):307-323
- 滕吉文,张中杰,万志超,杨顶辉,张慧. 1996b. 羌塘盆地及周边地带地球物理场与油气深部构造背景初探. 地球物理学进展,11(1):12-27
- 滕吉文,张秉铭,胡家富,温一波. 1997. 地震“孕育”的深部介质和构造环境. 见:陈运泰主编. 中国地震学研究进展——庆祝谢毓寿教授八十寿辰. 北京:地震出版社. 258-265
- 滕吉文. 1999. 对大庆油田未来的远景进行综合研究与评价的建议. 科技导报,(3,4):17-19
- 滕吉文,张中杰,王光杰,刘宏兵,胡家富,张秉铭,陈云,张慧. 1999. 喜马拉雅碰撞造山带深层动力过程与陆-陆碰撞新模型. 地球物理学报,42(4):481-494
- 滕吉文,张中杰,王光杰,王铁男. 2000a. 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. 地球物理学进展,15(4):1-35
- 滕吉文,张中杰. 2000b. 地球内部各圈层介质的地震各向异性与地球动力学. 地球物理学进展,15(1):7-35
- 滕吉文. 2001a. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害. 地学前缘,8(3):1-8
- 滕吉文. 2001b. 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. 台北,151-153
- 滕吉文. 2003a. 地球深部物质和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,27(1):3-21
- 滕吉文. 2003b. 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,10(1):117-140
- 滕吉文,张中杰,白武明等. 2004. 岩石圈物理学. 北京:科学出版社
- 滕吉文. 2004. 21世纪地球物理学的机遇与挑战. 中国科学院2004年科学发展报告. 北京:科学出版社,16-22
- 滕吉文. 2005. 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. 北京:科学出版社,327-344
- 滕吉文. 2006a. 当代地球物理学向何处去. 地球物理学进展,21(2):327-339
- 滕吉文. 2006b. 当今中国岩石圈物理学研究中的几个重要问题与思考. 地球物理学进展,21(4):1033-1042
- 滕吉文. 2006c. 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. 地质通报,25(7):767-771
- 滕吉文. 2006d. 青藏高原地球物理研究中几个重要问题之我见. 地学前缘,13(3):19-22
- 滕吉文,闫雅芬,王光杰,熊熊. 2006a. 大别造山带与庐庐断裂带壳、幔结构和陆内“俯冲”的耦合效应. 地球物理学报,49(2):449-457
- 滕吉文,王谦身,王光杰,徐亚,张雪梅. 2006b. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部地壳结构. 地球物理学报,49(4):1045-1052
- 滕吉文. 2007a. 中国地球物理学研究面临的机遇、发展空间和时代的挑战. 地球物理学进展,22(4):1101-1112
- 滕吉文. 2007b. 石油地球物理勘探的发展空间与自主创新. 石油物探,46(3):213-225
- 滕吉文,杨立强,姚敬金,刘宏臣,刘财,韩立国,张雪梅. 2007a. 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,22(2):317-334
- 滕吉文,刘建明,刘财,姚敬金,韩立国,张永谦. 2007b. 第二深部空间金属矿产探查与东北战略后备基地的建立和可持续发展. 吉林大学学报(地球科学版),37(4):637-651
- 滕吉文. 2008. 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,23(3):637-640
- 滕吉文,田有,刘财,韩立国. 2008a. 中国双相沉积盆地,古老结晶基底与东北地区深层潜在油气藏. 吉林大学学报(地球科学版),38(4):527-552

- 滕吉文,张雪梅,杨辉. 2008b. 中国主体能源—煤炭的第二深度空间勘探、开发和高效利用. 地球物理学进展, 23(1): 972-992
- 滕吉文,白登海,杨辉,闫雅芬,张洪双,张永谦,阮小敏. 2008c. 汶川 Ms8.0 强烈地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 51(5): 1-28
- 滕吉文. 2009. 中国地球深部物理学和动力学研究 16 大重要论点、论据与科学导向. 地球物理学进展, 24(3): 801-829
- 滕吉文,姚敬金,江昌洲,闫雅芬,杨辉,张永谦,阮小敏. 2009a. 地壳深部岩浆岩岩基体与大型、超大型金属矿床的形成与找矿效应. 岩石学报, 25(5): 1009-1038
- 滕吉文,杨立强,刘宏臣,闫雅芬,杨辉,张洪双,张永谦,田有. 2009b. 岩石圈内部第二深度空间金属矿产资源形成与集聚的深层动力学响应. 地球物理学报, 52(7): 1734-1756
- 滕吉文,阮小敏,张永谦,闫雅芬. 2009c. 沉积盆地、结晶基底和油、气成因理念与第二深度空间勘探和开发. 地球物理学报, 52(11): 2798-2817
- 滕艳. 2008. 地震预测研究和抗震须并轨进行——访国家汶川地震专家委员会成员、中国科学院院士滕吉文. 地质勘探报, 2008年5月29日, 第4版
- 王二七, Burchfiel BC, 季建清. 2001. 东喜马拉雅构造结新生代地壳缩短量的估算及其地质依据. 中国科学(D辑), 31(1): 1-9
- 王谦身, 滕吉文, 王光杰, 徐亚. 2005. 内蒙古阴山地区特异区域重磁场与深部构造. 地球物理学报, 48(2): 314-320
- 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 戚学祥, 刘福来, 曾令森, 刘敦一, 李海兵, 吴才来, 史仁灯, 陈松永. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. 岩石学报, 2(1): 1-12
- 许志琴. 2006. 青藏高原大陆动力学(1984~2006). 北京: 地质出版社
- 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 嵇少丞, 王宗起, 张泽明. 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用. 岩石学报, 24(7): 1433-1444
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. 地学前缘, 9(2): 442-450
- 赵素涛, 金振民. 2008. 地球深部科学研究的新进展——记 2007 年美国地球物理联合会(AGU). 地学前缘, 15(5): 298-316
- 赵文津. 2007. 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. 地球物理学进展, 22(4): 1113-1121
- 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 贺日政. 2006. 数值模拟在地球动力学中的研究进展. 地球物理学进展, 21(2): 360-369
- 周永胜, 何昌荣. 2004. 大陆岩石圈流变研究进展与高温高压流变实验现状. 地球物理学进展, 19(2): 246-254
- 朱光明, 杨文采, 杨正华, 杜有成, 杨贵明, 姚虹, 杨占江, 程振炎. 2008. 中国大陆科学钻探孔区的垂直地震剖面调查. 地球物理学报, 51(2): 479-490