

岩石圈三维结构与动力学数值模拟

石耀霖¹⁾, 周元泽¹⁾, 张 怀¹⁾, 王红才²⁾

1) 中国科学院研究生院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘 要: 通过基于专项所属各项的探测数据和成果, 结合课题组已经积累的数据与建模基础, 以及本项目组特定需要进行岩石物性参数测试及相关的流变本构关系研究, 进而开发并集成大规模并行有限元数值模拟平台系统, 进行地球动力学过程的综合定量模拟分析。同时建立高性能并行可视化平台, 据此进行中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合关系的探测数据与数值模拟结果的并行可视化研究分析, 探讨回答中国部分典型构造区域的典型地球动力学过程的关键问题。

关键词: 岩石圈; 三维结构; 动力学; 数值模拟

中图分类号: P542.5; P548 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2011.s1.08

Three-dimensional Structure of the Lithosphere and Dynamic Numerical Simulation

SHI Yao-lin¹⁾, ZHOU Yuan-ze¹⁾, ZHANG Huai¹⁾, WANG Hong-cai²⁾

1) *Laboratory of Computational Geodynamics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;*

2) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*

Abstract: Based on the exploration data and achievements obtained from various projects under the special project in combination with the data and the model-establishing basis accumulated by the research group as well as the specific need of this project group, the authors are to carry out the following research work: conduct the rock physical parameter test and the study of related rheological-constitutive relationship, develop and integrate the large-scale parallel finite element numerical simulation platform system, and perform the integrated quantitative simulation analysis of the geodynamic process; establish high-performance parallel visualized platform and, on such a basis, carry out the parallel visualized study and analysis of the exploration data for deep mantle convection and lithosphere coupling relationship of China's mainland as well the results obtained from numerical simulation, so as to investigate the key problems concerning the typical geodynamic process in some typical tectonic regions of China.

Key words: lithosphere; three-dimensional structure; dynamics; numerical simulation

岩石圈是地球外圈层部分, 浮在地幔软流层之上, 并因物质的比重大小及物性参数的不同而分成若干次级圈层。由于板块构造的俯冲、碰撞, 地幔物质上涌等构造运动和分异等化学变化, 从而使地壳岩石圈发生变质, 火山喷发, 岩浆侵入等造成十

分复杂的结构和复杂的地球动力学过程。

地球动力学是地球科学与力学相结合的跨学科研究分支, 它从地球整体运动, 地球内部和表面的构造运动探讨其动力演化过程, 进而寻求它们的驱动机制。它的核心内容是从力学分析的角度探讨地

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-07)资助。

收稿日期: 2010-08-26; 改回日期: 2010-12-27。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 石耀霖, 男, 1944 年生。中国科学院院士, 教授。主要从事地球动力学研究。通讯地址: 100049, 北京市石景山区玉泉路 19 号(甲)。E-mail: shy1@gscas.ac.cn。

球各圈层的发展演化特征。七十年代初板块学说的建立和兴起,以及GPS为主的大地测距技术的日臻完善(党亚民,2004;顾国华等,2001;邓起东等,2002;Gomez et al.,2007),世界及中国大陆地壳运动观测网络的建立(黄立人等,1998;李延兴等,1998;石耀霖等,2004),全球数字化台网的建立(乔书波等,2004;Zhang et al.,2004),深海钻探计划(<http://www.deepseadrilling.org/>),大陆断面计划(<http://www.earthscope.org/>),<http://www.sinoprobe.org/>)等多学科的联合研究已经取得了很大的进展。但是,在确定作用于板块上的力以及板块内部的力学响应的动力学研究方面仍存在问题(King et al.,1994;Micklethwaite et al.,2006)。因此,基于大规模并行计算的现代数值模拟技术和相关的岩性参数测定和流变性质研究,可以帮助我们对于地球的认识从运动学阶段进入到动力学阶段(Liu et al.,2007;Zhang et al.,2007a)。

大陆岩石圈的流变结构是开展大陆动力学过程模拟计算的必要前提(Li et al.,2006),而地下温度分布将强烈的影响岩石的流变性质(臧绍先等,1994;Bailey,2006;Liu et al.,2005a;叶正仁等,2001;金振民,1997)。因此,把野外数据和实验室数据结合起来,综合实验室数据、观测数据和科学研究结果数据,并综合其它关键性的约束条件,建立三维岩石圈温度分布模型(安美建等,2007),进而建立区域的岩石圈结构和流变模型,是目前和今后进行就东亚大陆区域动力学的实际科学问题进行(超)大规模数值计算模拟的前期关键性基础工作。

高性能数值模拟已经逐步成为了当代科学研究的第三种手段。开展高性能计算并行程序的编制工作,是本项目中的最核心关键的一环。发展我们有独立知识产权的有限单元法并行计算程序,特别是变形、热传递等物理作用耦合的问题计算程序,才能如实地认识客观规律,解决重大地球动力学科学问题(Zhang et al.,2007a)。

我国存在青藏高原、大别山超高压变质带、华北克拉通的破坏和演变等丰富的地质现象,存在世界最强烈的大陆板块内部的地震活动(傅容珊等,2000;曾融生等,1998)。青藏隆升过程和华北克拉通动力学过程是中国大陆重要的地球动力学过程,其影响着现今中国大陆构造格局,对我国的矿产资源和地震地质灾害分布均具有明显的控制作用(沈正康等,2003;王琪,2003)。

本研究专项中的各项目设置充分考虑到了上述因素,研究中将深度集成地球科学的基本问题、数

值建模、物性参数的实验室分析和标定、(超)大规模有限元数值模拟实验平台系统和大规模并行可视化平台系统。最终的研究目标为形成一整套计算地球动力学的科研平台环境,为深部探测项目提供计算模拟分析工具,满足深部探测项目在数值模拟分析工具方面日益增长的需要。本项目通过集成专项研究成果,以及本项目岩石力学和物理性质数据库为基础,建立计算网格库;编制自己拥有知识产权的程序库,也利用专项一些用户已经熟悉的商业软件,通过系统集成建立有限元程序计算平台;针对重要地质问题进行实例计算,作为计算平台功能的示范(Dzwinel et al.,2005)。这样能够满足专项和广大地质人员方便、快捷地学习和开展地球动力学模拟计算的需求,推动计算地球动力学研究在我国的健康发展。

此外,随着中国的经济快速发展,相关的资源、能源、环境以及关联的地震、海啸、泥石流等自然灾害问题越来越需要深部探测及相关技术为深部矿产资源与减灾防灾提供必要的支撑。同时,“深部探测技术与试验研究专项”相关项目(董树文等,2011)的开展为全面了解中国典型构造区域的深部结构提供了重要的基本参数,二者之间相辅相成。

进一步的研究工作包括,在此现有数据和本专题新增深部结构数据的基础上,进行集成和综合研究,通过数值模拟实验分析,将定性的认识提升为定量的认识,把概念模型提升到基于数学物理规律的计算模型,是整个专题研究中的重要一环。

近年来世界上计算科学技术的迅速发展,使得计算模拟成为与理论研究、实验研究同样重要的一种认识自然规律的重要手段。计算方法在许多自然学科和工程技术领域发挥找越来越大的作用。在地质科学中大力加强地球动力学计算模拟工作,针对我国典型的构造特征对应的动力学过程进行数值模拟,有特色地、扎实地解决我国地球动力学模拟中的一些基础性问题,将为我国资源、环境、减灾等迫切关注的问题做出贡献。

1 国内外现状与发展趋势

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的不可或缺的第三种手段。在核武器研究中,美国可以用计算代替真实实验,从而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。在固体地球科学和地球动力学研究中,数值模拟研究还相对薄弱,但正是

因此, 才有巨大的发展潜力、孕育着重大突破的可能性(Olson et al., 2003)。通过各种先进科技手段的高分辨率大陆深部探测和地表高精度长周期对地观测(党亚民, 2004; Zhao, 2004), 佐以多尺度超大规模并行数值模拟技术(Abe et al., 2004), 是揭示大陆演化奥秘, 并获取资源成矿、地震灾害等科学问题的深刻认识是世界发达国家地学研究中的前缘课题(Hardebeck et al., 2004; Cowgill et al., 2004a, 2004b; Jamieson et al., 2004; 徐锡伟等, 2005), 例如曾经蝉联世界超级计算机之首三年的日本的 Earth Simulator, 就是为解决地球科学问题而建造(<http://geofem.tokyo.rist.or.jp>)。通过合理的理论建模和准确恰当的约束输入, 解决大陆动力学的核心科学问题, 并提供以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、发生的物理过程, 是世界发达国家的重要研究目标。

国际上地球动力学模拟研究, 涉及地球整体及不同的地球圈层, 涉及不同的空间尺度和时间尺度(Dzwiniel et al., 2005; Townend et al., 2004; Hu et al., 2004)。近年取得突出进展的领域包括: 地核发电机模拟计算解释地磁场的起源和反转、变化; 地幔对流的计算解释全球板块构造的一些重大基础问题; 岩石圈动力学计算模拟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; 以已地震的孕育和发生过程的力学过程等。我国是区域动力学研究的最佳试验场, 国际学术领域给予了极大的关注。例如青藏高原地球动力学演变的模拟、华北克拉通破坏和演变的模拟、大别山超高压变质带形成机理的模拟等都是目前国际学术界研究的热点问题(路凤香等, 1997; 罗镇宽等, 1997; 李江海等, 1998; Lin et al., 2005; Liu et al., 2005b)。

对该过程的科学认识和探索, 首要任务是进行探测技术实验, 通过实施一系列技术实验获取有效的技术才能实现对地球深部探测。将地质学、地震学、高分辨率长周期卫星观测等多种高新技术组合集成起来, 进行综合探索。目前, 在深部地球物理探测技术中, 国际最先进的方法仍主要是地震学探测(Chen et al., 2006; Song et al., 2006; Zhang et al., 2006; Zhu et al., 2006; Pei et al., 2007)。

为此, 我国在近几年相继启动了“华北克拉通破坏”和“中国大陆深部探测技术集成与实验”等重大研究计划(国家自然科学基金, 2007)。这些重大研究计划的顺利开展和实施, 尤其在实验研究精细

地球物理深部探测高新技术、数据处理与反演成像技术、以及地质地球物理互动解释技术等跨学科研究领域的迅速发展, 为我们开展建立在超大规模并行有限元计算基础上的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分析提供了可宝贵的契机。

同时, 近年来的岩石技术和实验仪器的进步, 使得我们有条件对于岩石物理力学性质, 特别是岩石流变等性质, 进行深入的实验研究和测试分析, 从而给出较可靠的覆盖中国典型构造区域的物性结构剖面, 从而为大型数值模拟提供必不可少的本构关系参数(殷小艳等, 2006; 许文良等, 2006)。

时空多尺度与强耦合是中国大陆壳幔耦合演化过程的典型特征(Zhang et al., 2007b)。因此, 若要从根本上解决这些科学问题, 传统的简单建模, 简单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。取而代之的应该为通过严谨的地球动力学和计算数学建模, 并以超大规模并行数值模拟技术为最基本手段, 开展数值模拟试验和分析, 从时空多尺度的角度, 深入考察大陆深部地幔对流与岩石圈非线性强耦合关系的多种地球动力学演化模式, 并量化地研究中国大陆壳幔耦合的各种物理过程和各个圈层的耦合作用、了解壳幔耦合的动力学过程的基本特征, 识别决定性因素和关键性控制参数, 并给出合理的量化地球动力学的科学解释。

建立在合理地球动力学模型基础之上的超大规模并行数值模拟平台系统, 即可以从空间多尺度的角度, 分析不同地球动力学条件和横(侧)向边界条件对复杂介质性质岩石圈的变形过程中基本物理过程的制约机制, 从中找出局部地区变形、热与空隙流体间的耦合和相变物理基础, 并研究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, 找出深层地幔运动过程和华北克拉通破坏及地壳应力场分布的本质性物理联系, 研究构造应力场变化与华北历史大地震序列之间的主要关系等深刻的科学问题。而这些问题是以往借助于简单力学和数学模型无法解决的。

近几年来, 中科院研究生院计算地球动力学重点实验室在应用大规模并行有限元数值模拟技术研究地球动力学科学问题方面, 积累了很好的技术和人才基础。普通问题并行数值模拟规模可以达到几百万三维有限元网格规模, 经过专门设计的软件包, 研究的规模问题可以更大, 达到千万网格量级。因此, 我们在力所能及的基础上, 适时提出在中国大陆深部精细探测成果的基础上, 建立中国大陆深部

地幔对流与岩石圈耦合关系的多尺度、高分辨率超大规模并行有限元数值模拟分析。具体的科学研究项目将强调科学科学问题的前沿性:大陆深部地幔对流与岩石圈耦合演化过程是涉及地球浅部与深部、大规模成矿作用、生命重大演化与地质灾害的世界级系统地球科学过程。对它的研究成果,可以进一步增进对中国及邻区大陆岩石圈的物质、结构与状态的认识。研究它的地球动力学演化过程,还可以进一步研究这一地区在东亚大陆整体演化系统行为中局部岩石圈的动力学过程,从而探索地球内部圈层相互作用及演化对矿产资源的控制机理,为固体地球系统科学理论的深入完善及矿产资源的可持续探测做出创新性贡献。

始建于 1978 年的中国地质科学院地质力学研究所高温高压及常规岩石力学实验室,于 1993 年通过国家计量单位认证成为部级重点开放实验室。2005 年在科技部的科学仪器设备升级改造专项资金的资助下,对实验室刚性伺服压机系统进行了整体升级改造,实验机的性能达到国际先进水平并通过北京市计量科学检测研究院的计量检测。该实验室在深部地质的研究工作中,通过高温高压岩石力学试验手段模拟地壳-上地幔的温度压力条件下的岩石变形实验研究,分析岩石形变在高温、高压下与构造应力之间关系,加深了对地球深部动力学过程的认识,同时在深部岩石力学性质研究、油气和固体能源勘探和开发等工作方面也有重要进展。

2 项目目标与研究任务

2.1 项目目标

研究目标主要解决三个核心问题:建立覆盖中国大陆不同构造单元的主要岩石类型物性参数数据库;建立大规模有限元三维数值计算模拟需要的网格库、物性参数库,三维有限单元法计算程序库及可视化工具的数值模拟实验分析基础架构系统,并针对对典型科学问题进行数值计算计算和分析,从而验证基础架构平台系统的正确性、有效性和高性能计算效率;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观测资料,运用数理科学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与岩石圈耦合演化过程时地球内部不同物理过程和不同圈层物质的相互作用,提升对大陆形成与演化的认知水平,为了解局部成矿基本机理与动力学演化关系、矿产资源形成、减轻地震灾害危害等科学提供

参考意见。

2.2 主要任务和研究内容

(1)完善和改进各种岩石物理性质实验测量方法:通过野外现场采样直接测试及实验室物理性质参数多方法测试,获取相关的岩石物性参数(密度、电、声、孔、渗、热、变形等物理特性),进而研究地壳圈层物性分布及流变特性及其与物质组成等参量和岩石变形特征间相互关系;建立中国重点地区岩石物性数据库;

(2)建立地球动力学计算平台:根据地壳结构探测资料和岩石物理性质实验结果,建立全国和重点区域大规模有限元数值模拟计算网格库;建立界面友好,使用方便的三维有限单元法计算程序库,涵盖固体、流体、粘弹性体动力学、热传递、孔隙流体等耦合动力学问题的计算程序;建设科学计算结果可视化平台硬件和软件平台系统。通过实例计算,验证平台的正确性和有效性,并提供方便快捷使用计算平台开展地球动力学模拟计算的手册和说明;

(3)结合以往和最新研究成果,从岩石圈动力学-热力学等方面的耦合演化模型出发,通过大规模有限元数值模拟实验的方式,量化研究中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合演化过程中自中生代破坏以来若干关键性地球动力学控制参数,量化模拟这些关键参数所起的作用,并就这些参数发生突变的前提条件和可能结果开展数值模拟实验研究,从而探讨中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合演化过程的基本物理问题。在此基础上,对目前国内和国际科学家提出的地幔对流造成热-化学侵蚀、重力失稳造成岩石圈拆沉等破坏模式假说进行数值模型试验与检验;

(4)根据层析成像等地震学研究结果和 GPS 等空间大地测量观测结果,量化考察太平洋板块俯冲和印度大陆碰撞对中国大陆地区新生代以来地球动力学过程的影响。科学解释层析成像观测到的太平洋板块低角度俯冲和平卧滞留于 660 公里相变界面的观测事实、相关地球动力学和热化学等方面的关键性参数和它们发生突变的制约条件和机理,从而为地质和地球物理学家最终解决这一科学问题提供重要的理论参考依据;探讨在现今中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合演化过程的背景下,考虑岩石圈热结构、流变结构和断裂带分布以及影响华北克拉通地区构造应力场和地震活动性的关键性因素。

3 关键科技问题与创新性

3.1 关键科技问题

(1)数值模拟平台:建立一个功能强大,运行可

靠的专门用来模拟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是本项目的重中之重。我们将利用有限元方法, 结合目前国际上先进的大规模和超大规模数值计算算法, 在现有研究工作基础上, 整合和开发一个三维有限元大规模并行数值模拟平台系统。系统中的数值计算模型将专门针对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问题的壳-岩石圈地幔-软流圈地幔和上地幔演化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这一核心科学问题。

从我们以往的研究经验得知, 若要模拟本项目目标所涉及到的微小尺度的地幔对流环, 需要的模型网格数将在 1 百万到 3 百万量级上。因此在算法和并行技术上必须进行特殊处理, 如百万-千万量级非结构化网格生成技术(支持复杂空间物性参数分布不均匀性和相互交错参数断层带、层析成像结果、地表高程以及其它重要物理参数等的输入)、并行分区技术实现、大规模线性系统的并行迭代求解、强耦合模型的有限元算法实现和通信的优化等; 另外, 由于计算模拟产生的结果数据文件量巨大, 直接实现大规模数据可视化是本项目非常关键的问题之一, 需要有可靠的解决方案和丰富的研究经验和研究成果支持。

(2)岩石变形本构实验研究: 目前现有的岩石流变本构关系大多是基于相关物性推测或类比过来的, 需要更多直接测试数据的支撑。本项目针对我国典型区域的主要岩石的相关参数进行实验室内岩石物性(密度、电、声、孔、渗、热、岩石变形本构等)参数测定及参数关系研究。已有的实验数据揭示, 不同的温度和压力水平下岩石变形特征差异较大, 简单的类比推测会产生较大的误差, 利用先进的实验仪器系统测试岩石变形参数, 有利于正确表述岩石(岩体)的受力变形本构关系, 提高数值模拟的正确性。

(3)数学物理方程(组)的选择和建立: 这一问题的核心涉及到两个。①合理性: 能够从物理基础上充分描述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问题的壳-岩石圈地幔-软流圈地幔和上地幔演化耦合问题的选择和建立; ②以及能够准确描述中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合关系演化问题的相应地球动力学边界条件的引入。本问题的关键涉及到牛顿流体(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数学物理方程的选择、建立与实际科学问题的正确描述和表达。

3.2 技术难点

在岩石力学实验中开展高温高压蠕变实验具有很高的技术要求, 包括试件的制备、在几小时甚至更长的时间内保持加载和测试系统的稳定等。在定量计算模拟方面的技术难点包括:

(1)有限元方法高性能并行计算的实现。现代科学问题要求大规模科学计算, 串行计算的规模往往不能达到科学问题的要求。为了更真实客观的仿真, 需要大规模并行计算。因此, 为实现并行计算, 并且提高运算效率, 编制高性能的计算程序是本项目中的主要技术难点。本项目将利用并行有限元程序自动生成系统, 对复杂问题形成初步的源代码, 在此基础上进行优化设计, 以求提高工作效率, 提供高质量的程序库。

(2)在地球动力学问题中往往涉及力学变形、热传递、孔隙流体运动、相变和化学反应等多种复杂因素, 对多种因素的耦合作用的定量数值模拟需要同时几种类型的偏微分方程组, 会对计算的稳定性形成挑战。例如, 在固体力学问题中温度变化会产生热应力, 在流体力学中温度变化造成密度变化是造成热对流运动的主要原因; 而岩石的运动变形或岩石内孔隙流体的流动又会造成对流热传递, 影响温度的分布。针对不同的耦合问题, 需要采取不同的方法, 避免数值振荡, 获得精确可靠的解答。

(3)现代高性能数值模拟计算产生大量的结果数据, 如何充分利用和分析三维计算结果得到科学的认识是一个现实的问题。科学计算结果的可视化和分析是伴随高性能计算而来的一个重要学科方向, 也是本研究项目的一个亟待解决的难题。可视化系统必须具备准确快捷地表达出各种不同标量、矢量和张量场的二维或者三维图像、二维剖面, 等值线, 等值面等可视化结果的能力。同时, 由于数值模拟结果分辨率的要求, 普通的单个屏幕显示受到分辨率的限制, 如果显示全局, 则局部细节无法显示; 而放大局部、又会丧失了全局图像。因此需要多个标准屏幕组成并行显示大屏幕, 同时显示全局和各个细节。这方面需要硬件配置和软件支持的工作。

3.3 创新性

在科学上主要集成地质、地球物理观测资料, 以及基于对我国大陆主要典型岩石类型系统的岩石物理力学参数测试建立的岩石物性参数数据库, 探索不同温、压条件下的岩石变形本构关系, 进一步运用数理科学定量方法和高性能并行计算技术, 对

我国大陆和邻区岩石圈动力学过程的时空特征与控制机理进行数值模拟,定量认识地球内部不同物理过程和不同圈层物质的相互耦合作用,加深对我国大陆岩石圈演化过程的定量化认知水平,为了解矿物资源形成、减轻地震灾害危害等重大实际问题提供参考。这是一项过去没有做过的集成性的工作。

其中,利用有限单元法程序自动生成系统生成三维并行有限单元法程序技术先进;集成野外和实验室成果建立岩石物性数据库,计算网格库于计算平台思路新颖。在计算实例中涉及的青藏高原深部地幔物质与岩石圈地壳运动的耦合作用、下地壳物质流动特点;华北克拉通引张裂解的地质历史过程和目前地壳应力场与地震现今特点的综合解释等体现了我们独特的思路 and 观点。

4 技术路线与研究方法

4.1 技术路线

(1)一种崭新的研究模式和尝试:本研究项目的开展的目的之一就是尝试用一种新的研究手段对中国大陆深部动力学进行研究。研究者注意到了近年来大规模和超大规模并行计算机硬件技术的迅速革新、大规模并行计算算法和软件实现技术的蓬勃发展、以及海量地球科学数据的实时更新和处理,尤其是数据网格和高性能网格计算所具有的广阔发展前景。如果将这些有利因素及时应用到计算地球动力学中来,将会对计算地球动力学的发展起到非常大的推动作用。结合美国的 Computational Infrastructure for Geodynamics (www.geodynamics.org)的实现思想,完成一个能够使用大规模实时观测数据和岩石学实验数据的大规模并行计算软件平台。这个软件平台能够综合考虑青藏高原在印度板块推挤作用下的压缩变形和隆升、中国大陆在菲律宾板块和太平洋板块的俯冲作用下的边界约束及其变形、岩石分布和力学、热力学性质参数沿地表水平方向分布的不均匀性和沿径向分布的不均匀性、相对稳定的活动地块和克拉通对变形分布的影响、青藏高原的隆升所产生的重力位能、主要活动断层的影响等影响中国大陆地球动力学的重要因素。这将为今后的中国陆地地球动力学研究提供一个崭新的研究模式。

(2)首次建立中国大陆主要岩石类型物性参数数据库:通过收集现有研究成果以及本项目测试的相关物性数据,建立覆盖我国典型区域的主要岩石物性参数数据库,进行统计分析乃至数据挖掘以提取岩石物性参数基本规律,为大陆深部动力学过程的三维大规模数值模拟提供必不可少的基础数据。

(3)分析与综合:过去各个研究项目对中国大陆深部动力学的研究,是将研究者关心的某一或部分影响因素提炼出来,利用简单的模型进行讨论。采用这种模拟研究方式的优点是能够将所研究的问题探讨的清晰明确,缺点是不能够对各种制约因素方在统一的模型下讨论。但是,实际的中国大陆深部地球动力学问题是一个时空多尺度的、综合复杂问题,各种影响因素之间相互关联,相互耦合。没有一个能够综合容纳各种最重制约因素的模型,就不能实现对研究问题一个整体的认识。本研究项目的开展,将首先对各个关键性参数逐一通过数值试验分析,并最后系统地、科学地集成到一个超大规模并行数值模拟平台系统中,为开展中国大陆深部动力学研究提供一个非常有益的补充和综合研究平台。

4.2 研究方法

大规模并行计算技术是研究现代地球动力学的一个很好的武器,但是仍然需要使用得当。它允许研究者将很多问题考虑其中,却从另外一个方面容易造成考虑因素过多而深陷其中。故我们将采用分析与综合,小规模的计算试验与大规模的并行计算综合模拟相结合实现方法。例如,选用简单的分层粘度模型(三明治结构),首先将太平洋俯冲的作用作为边界条件引入,得到合理的计算结果;再逐步引入印度洋板块推挤和重力位势的影响,对数值模拟结果进行对比。在项目开展过程中,动态地引入基于野外及实验室的系统测试所获取目标构造区域的三维物性分布和流变特征等数据,进行模拟测试,最后将测试好的结果纳入到大规模并行计算模型中。

中国大陆深部动力学数值模拟模型将选用不同的坐标系,在选取适当的边界条件下,分别比较考虑各种不同影响因素(如重力位势、粘度参数、弹性模量等物性参数)的情况下对数值模拟结果进行分析比较,以及各种参数随时间、空间分布(如容易流动的中地壳)以及不同边界条件下对中国大陆深部动力学演化过程的制约作用和产生的影响。

最终,若要完成本项目提出的目标,仍然需要进一步地,脚踏实地、扎扎实实地艰苦努力才能得到令人满意的科学研究成果。此外,本研究项目经过大量的前期准备工作,取得了一些进展,得到了初步的计算结果。为了将本研究项目继续顺利推进,迫切需要国内同行专家的指导和建议。

5 工作部署与任务分解

5.1 工作部署

为保证研究项目的顺利进行,本研究将任务主

要分解为如下五个子课题。①数值模拟平台建设、②岩石物理性质测试与实验研究、③中国大陆不同构造单元主要岩石类型物性参数测试与数据库构建、④中国大陆岩石圈热状态和流变性质研究以及⑤中、新生代华北克拉通的动力学过程以及青藏高原隆升过程动力学特征的数值模拟。

5.2 课题设置与任务分解

课题一、数值模拟平台建设。主要任务: 包括数值模拟相关的三维有限元并行计算程序库以及相关的可视化平台, 同时建设数值计算模型将专门针对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问题的壳-岩石圈地幔-软流圈地幔和上地幔演化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等系列地球动力学过程重要问题。

课题二、岩石物理性质测试与试验研究。主要任务: 主要任务是对第三课题所获数据进行综合分析、数据挖掘, 以及针对物性试验研究中存在的一些问题

进行专题试验研究。主要包括: (1)通过大量测试数据的统计对比分析, 研究各种物性参数之间的关系以及在不同构造环境、不同年龄、不同变形历史条件下的物性特征, 特别是在 200MPa 以下的变化特征, 获取有关规律性认识; (2)实验室测试结果与实地勘测结果的对比研究(实用性分析); (3)计算与实测的对比研究; (4)地震波各向异性专题试验研究。

课题三、中国大陆主要岩石类型物性参数测试与数据库构建。主要任务: 主要任务针对本专项中地球物理探测及地球动力学模拟工作的部署, 并结合我国主要构造单元典型岩石类型, 采集岩石标本, 进行岩石物性参数的测试(包括: 岩石密度、电阻率、波速、孔隙度、渗透率、热导率、弹模、泊松比、内聚力、内摩擦角及不同温-压条件下变形本构等), 岩石样本采集区主要为首都圈、西南三江、汶川等地区; 并系统收集现有的岩石物理力学参数结果, 综合分析整理; 初步建立我国岩石物性数据库, 为地球物理反演和大型数值模拟计算分析提供基础数据, 并实现成果的社会共享。具体的研究部署如图 1。

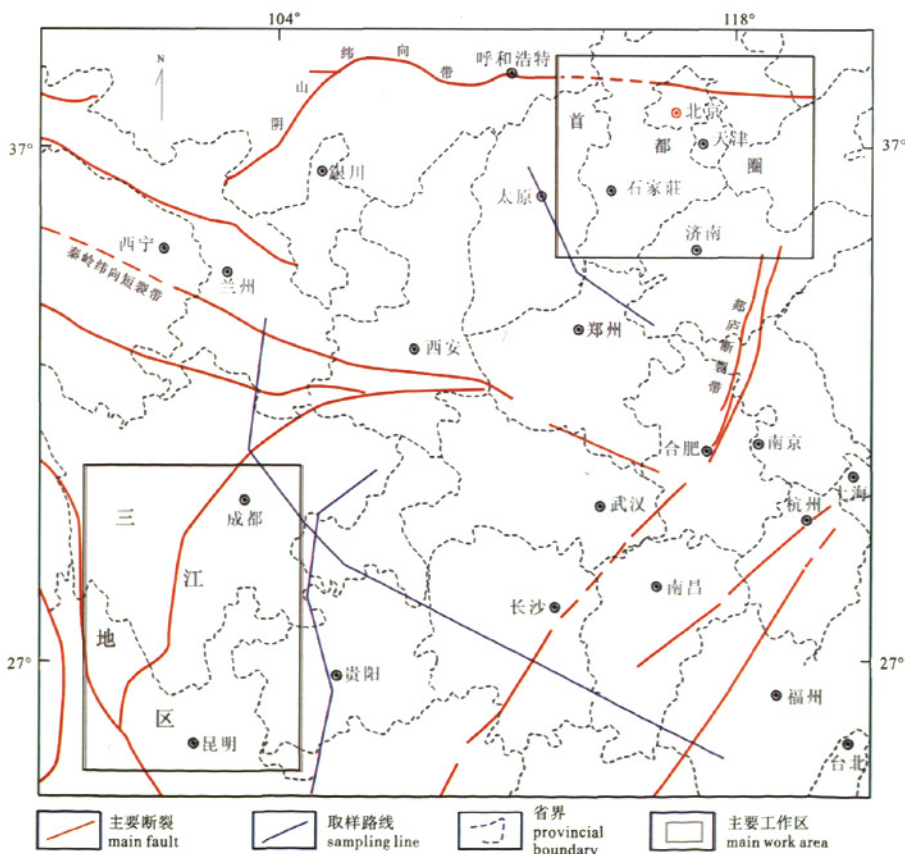


图 1 项目野外工作部署图
Fig. 1 Arrangement of the field work

课题四、中国大陆岩石圈热状态和流变性质研究。主要任务：主要综合利用实验室最新成果和野外多种资料，包括地热资料、地震波速、居里面深度等反映现今温度状态的地球物理资料，以及岩浆岩、变质岩反映的古老地质时期的资料，确定中国大陆岩石圈的热状态，进而估算深部岩石的流变性质，并与野外观测反演的深部岩石流变性质校验，以及实验室内对岩石物性参数(电、声、孔、渗、热等物理特性)测定及其与物质组成等参量和岩石变形特征间相互影响进行研究，从而给出我国大陆岩石圈流变参数三维分布及误差估计。

课题五、中、新生代华北克拉通的动力学过程以及青藏高原隆升过程动力学特征的数值模拟。主要任务：主要在于深入考察(1) 探索应力场分布与强震发生的关系，探讨如何对板内强地震孕育有利环境进行识别；分别根据华北地区和川滇地区历史地震序列和近年 GPS 观测，在三维模拟基础上重演应力场变化和地震序列发生历史，估计初始应力状态并探讨其不确定性对地震序列的影响，对我国大陆地区未来地震活动危险性提出参考意见；(2) 青藏高原复杂的地壳结构和横向不均匀性流变性质的影响、主要控制断层系在青藏高原变形和隆升过程中的作用、重力位能的作用、深部软流层物质运动对高原的影响等问题。

5.3 关联行动

本项目研究的特点是在专项其它项目基础上进行综合集成研究，在各项目获取的数据资料基础和定性分析认识的基础上，开展基于数学物理规律的定量计算模拟研究，将对地质问题取得更加深入的认识。因此，本项目研究中将与其它项目加强交流和合作：一、本项目中的岩石力学性质的测试采样，要与其它项目重点研究地区和任务相配合，以便对重点地区获得比较完整的资料；二、不仅要使用其它项目获得的数据，并且要了解其它项目资料数据的误差和可靠性，使得在模型网格化和计算中心中有数；三、了解其它项目对计算模拟的需求，使计算平台的建设更加适应地质工作的需要，更加便于用户的使用。

6 预期成果及效益分析

建立覆盖我国重点区域的岩石物性参数数据库；包括岩石渗透率、声波、电、热等物理特性及岩石变形特征及变形本构关系等。通过岩石物性测试和流变本构关系研究，有助于我们解释野外勘探工作成果，构建岩石圈结构模型和计算网格，提供地球

动力学模拟的基础，以便认识地球内部复杂的动力学过程。同时为工程地质、防治地质灾害等提供重要参考。

大规模并行有限元数值模拟及可视化平台：我国和重点地区的模型计算网格库；各类基础问题的有限单元法程序库；建立并行可视化系统。由网格库、程序库和可视化系统组成的计算平台，可以为地质学家提供地球动力学数值模拟的方便、可靠、快捷的工具，有力地促进我国地质科学中动力学定量模拟的发展，提高我国地球动力学模拟研究水平。特别在应急情况下，不需要再临时收集资料、绘制网格，而可以根据模拟地区、问题的需要，调用所在区域适度的计算网格模型，利用程序库立即开展计算。

实验技术新技术方法探索和实验结果的深入认识解释的工作报告和论文发表：例如钻孔岩芯卸压后的蠕变变形试验结果、岩石物理性质与物质组成关系及从矿物性质及组成比例计算岩石性质、岩石物理性质与微观结构的关系、岩石个物理性质参数之间的经验公式等。岩芯卸荷蠕变实验方法如果成功，新可行与科学深钻工作结合，对地应力方向随深度变化提供更丰富的数据。利用经验公式、数值计算估算岩性，可以大大拓宽实验结果的应用范围，减少耗费时间和人力物力资源的试验工作，提高工作效率。

计算平台的实例计算：包括华北克拉通问题、青藏高原动力学问题、基于历史地震序列资料 and 现今应力唯一测量的三维应力场分布和演变规律等研究。发表相关的学术论文。为计算平台的使用和推广提供经验和范例。

多尺度分析的科学思路，为三维模拟提供深部和底面边界条件的方法提供启示。软弱下地壳在青藏高原、台湾等区域对地球动力学过程和地震活动的影响。应力场的成因计算模拟，地震造成的应力场变化，出示应力场的影响等研究，为地震的数值预报做预备性工作。

致谢：本研究受到国土资源部深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-07)和中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-123)共同资助。本研究同时还是中国科学院研究生院计算地球动力学实验室可视化工作的一个组成部分。该研究项目同时得到了国家重点基础研究发展规划项目(2008CB425701)和十一五863 计划信息技术领域面向地球系统模式研究的高性能计算支撑软件系统重点项目“地球系统模式海量数据的快速可视化及诊断分析技术研究

(2010AA012402)”的支持。我们感谢审稿人卓有成效的建议。

参考文献:

安美建, 石耀霖. 2007. 中国大陆地壳和上地幔三维温度场[J]. 中国科学(D)辑: 地球科学, 37(6): 736-745.

克亚民. 2004. GPS 和地球动力学进展[J]. 测绘科学, 29(2): 77-79.

邓超东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D)辑: 地球科学, 32(12): 1020-1030.

董树文, 李廷栋, SinoProbe 团队. 2011. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe)[J]. 地球学报, 32(S1): 3-23.

傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 李力刚. 2000. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟[J]. 地球物理学报, 43(3): 346-355.

顾国华, 申旭辉, 王敏. 2001. 利用 GPS 观测到的中国大陆地壳水平运动[J]. 全球定位系统, 26(4): 23-30.

国家自然科学基金. 2007. 2007 年度重大研究计划“华北克拉通破坏”申请指南[J]. 地球科学进展, 22(3).

黄立人, 郭良迁. 1998. 华北(北部)地区的地壳水平运动特征及其模型—GPS 测量结果的初步分析[J]. 地壳形变与地震, 18(2): 20-27.

金振民. 1997. 我国高温高压实验研究进展和展望[J]. 地球物理学报, 40(增刊): 70-81.

李江海, 钱祥麟, 谷永昌. 1998. 华北克拉通古元古代区域构造格架及其板块构造演化探讨[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 23(3): 230-235.

李延兴, 胡新康, 赵承坤, 王敏, 郭良迁, 徐菊生. 1998. 华北地区 GPS 监测网建设、地壳水平运动与应力场及地震活动性的关系[J]. 中国地震, 14(2): 116-125.

路凤香, 郑建平, 王方正, 孙平, 刘永顺, 赵磊. 1997. 华北克拉通、扬子克拉通与秦岭造山带古地幔组成及状态的对比[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 22(3): 247-251.

罗镇宽, 苗来成, 关康, 黄佳展. 1997. 华北克拉通和西澳克拉通金矿床对比研究及其对中国金矿勘查的启示[J]. 贵金属地质, 6(1): 63-71.

乔书波, 孙付平, 朱新慧, 李健, 丛明日. 2004. GPS/VLBI/SLR/InSAR 组合在地球动力学研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 24(3): 92-97.

沈正康, 王敏, 甘卫军, 张祖胜. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. 地学前缘, 10(特刊): 93-100.

石耀霖, 朱守彪. 2004. 利用 GPS 观测资料划分现今地壳活动块体的方法[J]. 大地测量与地球动力学, 24(2): 1-5.

王琪. 2003. 中国大陆现今地壳运动研究[J]. 地震学报, 25(5): 453-464.

徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, 27(3): 446-461.

许文良, 杨承海, 杨德彬, 裴福萍, 王清海, 纪伟强. 2006. 华北

克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩——对岩石圈减薄机制的制约[J]. 地学前缘, 13(2): 120-129.

叶正仁, HAGER B H. 2001. 全球地表热流的产生与分布[J]. 地球物理学报, 44(2): 171-179.

殷小艳, 万渝生, 刘敦一, WILDE S A, 周红英, 伍家善. 2006. 鞍山地区铁架山花岗岩中表壳岩的碎屑锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(4): 282-286.

臧绍先, 宁杰远, 陈玉文, 周丽梅. 1994. 两种地幔对流模式下降冲带的结构[J]. 地球物理学报, 37(4): 448-455.

曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 1998. 喜马拉雅——祁连山地壳构造与大陆——大陆碰撞过程[J]. 地球物理学报, 41(1): 49-60.

References:

ABE S, PLACE D, MORA P. 2004. A parallel implementation of the lattice solid model for the simulation of rock mechanics and earthquake dynamics[J]. Pure and Applied Geophysics, 161(9-10): 2265-2277.

AN Mei-jian, SHI Yao-lin. 2007. Three-dimensional thermal structure of the Chinese continental crust and upper mantle[J]. Science in China (Series D): Earth Science, 37(6): 736-745(in Chinese).

BAILEY R C. 2006. Large time step numerical modelling of the flow of Maxwell materials[J]. Geophysical Journal International, 164(2): 460-466.

CHEN Zhi-hong, LU Song-nian, LI Huai-kun, LI Hui-min, XIANG Zhen-qun, ZHOU Hong-ying, SONG Biao. 2006. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 28(1): 99-115.

COWGILL E, ARROWSMITH J R, YIN An, WANG Xiao-feng, CHEN Zheng-le. 2004b. The Akato Tagh bend along the Altyn Tagh fault, northwest Tibet 2: Active deformation and the importance of transpression and strain hardening within the Altyn Tagh system[J]. Geological Society of America Bulletin, 116(11-12): 1443-1464.

COWGILL E, YIN An, ARROWSMITH J R, WANG Xiao-feng, ZHANG Shuan-hong. 2004a. The Akato Tagh bend along the Altyn Tagh fault, northwest Tibet 1: Smoothing by vertical-axis rotation and the effect of topographic stresses on bend-flanking faults[J]. Geological Society of America Bulletin, 116(11-12): 1423-1442.

DANG Ya-min. 2004. Progress in GPS and the geodynamics[J]. Science of Surveying and Mapping, 29(2): 77-79(in Chinese with English abstract).

DENG Qi-dong, ZHANG Pei-zhen, RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, MIN Wei, CHU Quan-zhi. 2002. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. Science in China(Series D): Earth Science, 46(4): 356-372(in Chinese).

DONG Shu-wen, LI Ting-dong, SinoProbe Group. 2011. Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)[J].

- Acta Geoscientia Sinica, 32(S1): 3-23.
- DZWINE W, YUEN D A, BORYCZKO K, BEN-ZION Y, YOSHIOKA S, ITO T. 2005. Nonlinear multidimensional scaling and visualization of earthquake clusters over space, time and feature space[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(1):117-128.
- FU Rong-shan, XU Yao-min, HUANG Jian-hua, LI Li-gang. 2000. Numerical simulation of the compression uplift of the Qinghai-Xizang plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(3): 346-355(in Chinese with English abstract).
- GOMEZ F, KARAM G, KHAWLIE M, MCCLUSKY S, VERNANT P, REILINGER R, JAAFAR R, TABET C, KHAIR K, BARAZANGI M. 2007. Global Positioning System measurements of strain accumulation and slip transfer through the restraining bend along the Dead Sea fault system in Lebanon[J]. *Geophysical Journal International*, 168(3): 1021-1028.
- GU Guo-hua, SHEN Xu-hui, WANG Min. 2001. Horizontal crustal movement in Chinese mainland obtained from GPS observations[J]. *GPS World of China*, 26(4): 23-30(in Chinese with English abstract).
- HARDEBECK J L, MICHAEL A J. 2004. Stress orientations at intermediate angles to the San Andreas Fault, California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109, B11303.
- HU Yan, WANG Ke-lin, HE J, KLOTZ J, KHAZARADZE G. 2004. Three-dimensional viscoelastic finite element model for post-seismic deformation of the great 1960 Chile earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109, B12403.
- HUANG Li-ren, GUO Liang-qian. 1998. Crustal horizontal motion model and its features in northern part of North China: preliminary analysis of GPS measurement data[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 18(2): 20-27(in Chinese with English abstract).
- JAMIESON R A, BEAUMONT C, MEDVEDEV S, NGUYEN M H. 2004. Crustal channel flows: 2. Numerical models with implications for metamorphism in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109, B06407.
- JIN Zhen-min. 1997. The Progresses and perspectives of high-T and high-P experimental study in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 40(S1): 70-81(in Chinese with English abstract).
- KING G C P, STEIN R S, LIN Jian. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 935-953.
- LI Jiang-hai, QIAN Xiang-lin, GU Yong-chang. 1998. Outline of paleoproterozoic tectonic division and plate tectonic evolution of north China Craton[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geoscience*, 23(3): 230-235(in Chinese with English abstract).
- LI Qing-song, LIU Mian. 2006. Geometrical impact of the San Andreas Fault on stress and seismicity in California[J]. *Geophysical Research Letters*, 33, L08302.
- LI Yan-xing, HU Xin-kang, ZHAO Cheng-kun, WANG Min, GUO Liang-qian, XU Ju-sheng. 1998. Establishment of the GPS monitoring network in North China and relationship between the crustal horizontal motion and the stress field and seismicity[J]. *Earthquake Research in China*, 14(2): 116-125(in Chinese with English abstract).
- LIN Ge, ZHANG Y, GUO Feng, WANG Yue-jun, FAN Wei-ming. 2005. Numerical modelling of lithosphere evolution in the North China Block: Thermal versus tectonic thinning[J]. *Journal of Geodynamics*, 40(1): 92-103.
- LIU Mian, YANG You-qing. 2005b. Contrasting seismicity between the North China and South China blocks: Kinematics and geodynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 32, L12310.
- LIU Mian, YANG You-qing, LI Qing-song, ZHANG Huai. 2007. Parallel computing of multi-scale continental deformation in the western United States: Preliminary results[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 163:35-51.
- LIU Mian, ZHANG Huai, YANG You-qing. 2005a. Diffuse crustal deformation in Asia: from kinematics to geodynamics[C]. AGU, Abstract #U51B-03.
- LU Feng-xiang, ZHENG Jian-ping, WANG Fang-zhen, SUN Ping, LIU Yong-shun, ZHAO Lei. 1997. The comparison of constitution and thermal condition in North China craton(NC), Yangtze craton(YZ) and Qinling(QL) orogenic belt[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 22(3): 247-251(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, GUAN Kang, HUANG Jia-zhan. 1997. Comparison of gold deposits between North China and Western Australia cratons and its guidance to gold exploration in China[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 6(1): 63-71(in Chinese with English abstract).
- MICKLETHWAITE S, COX S F. 2006. Progressive fault triggering and fluid flow in aftershock domains: Examples from mineralized Archaean fault systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1-2): 318-330.
- National Natural Science Foundation of China. 2007. Guide to major research plan of studies on the destruction of North China craton (2007)[J]. *Advances in Earth Science*, 22(3): 328-328(in Chinese).
- OLSON P, RICHARDS M. 2003. Computational Infrastructure for Geodynamics[EB/OL]. [2010-10-10]. <http://www.geodynamics.org/cig/>.
- PEI Shun-ping, ZHAO Jun-meng, SUN You-shun, XU Zhong-huai, WANG Su-yun, LIU Hong-bing, ROWE C A, TOKSOZ M N, GAO Xing. 2007. Upper mantle seismic velocities and anisotropy in China determined through Pn and Sn tomography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112, B05312.
- QIAO Shu-bo, SUN Fu-ping, ZHU Xin-hui, LI Jian, CONG Ming-ri. 2004. Application of GPS/VLBI/SLR/InSAR combination to geodynamics[J]. *Journal of Geodesy and Geody-*

- namics, 24(3): 92-97(in Chinese with English abstract).
- SHEN Zheng-kang, WANG Min, GAN Wei-jun, ZHANG Zu-sheng. 2003. Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(Suppl): 93-100(in Chinese with English abstract).
- SHI Yao-lin, ZHU Shou-biao. 2004 Method for division of present active crustal blocks by GPS survey data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(2): 1-5(in Chinese with English abstract).
- SONG Shu-gang, ZHANG Li-fei, NIU Yao-ling, SU Li, SONG Biao, LIU Dun-yi. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: a case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 47(3): 435-455.
- TOWNEND J, ZOBACK M D. 2004. Regional tectonic stress near the San Andreas fault in central and southern California[J]. *Geophysical Research Letters*, 31, L15S11.
- WANG Qi. 2003. Current crustal movement in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 25(5): 453-464(in Chinese with English abstract).
- XU Wen-liang YANG Cheng-hai, YANG De-bin, PEI Fu-ping, WANG Qing-hai, JI Wei-qiang. 2006. Mesozoic high Mg diorites in eastern North China craton: constraints on the mechanism of lithospheric thinning[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 120-129(in Chinese with English abstract).
- XU Xi-wei, ZHANG Pei-zhen, WEN Xue-ze, QIN Zun-li, CHEN Gui-hua, ZHU Ai-lan. 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan province and its adjacent regions[J]. *Chinese Journal of Seismology and Geology*, 27(3): 446-461(in Chinese with English abstract).
- YE Zheng-ren, HAGER B H. 2001. Generation and distribution of global heat flow[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(3): 171-179(in Chinese with English abstract).
- YIN Xiao-yan, WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, WILDE S A, ZHOU Hong-ying, WU Jia-shan. 2006. Formation time of supracrustal rocks in Tiejiaoshan granite of the Anshan area: evidence from detrital zircon SHRIMP dating[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 282-286(in Chinese with English abstract).
- ZANG Shao-xian, NING Jie-yuan, CHEN Yu-wen, ZHOU Li-mei. 1994. Thermal structures of the subduction zones for two types of mantle convection models[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 37(4): 448-455(in Chinese with English abstract).
- ZENG Rong-sheng, DING Zhi-feng, WU Qing-ju. 1998. The crustal structures from Himalaya to Qilian and its implications for continent-continent collision process[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 41(1): 49-60(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Huai, LIU Mian, SHI Yao-lin, YUEN D, YAN Zhen-zhen. 2007a. Toward an automated parallel computing environment for geosciences[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 163(1-4): 2-22.
- ZHANG Jian, ZHAO Guo-chun, LI San-zhong, SUN Min, LIU Shu-wen, WILDE S A, KRÖNER A, YIN Chang-qing. 2007b. Deformation history of the Hengshan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Journal of Structural Geology*, 29(6): 933-949.
- ZHANG Kai-jun, CAI Jian-xin, ZHU Jun-xing. 2006. North China and South China collision: Insights from analogue modeling[J]. *Journal of Geodynamics*, 42(1-3): 38-51.
- ZHANG Pei-zhen, SHEN Zheng-kang, WANG Min, GAN Wei-jun, BURGMANN R, MOLNAR P, WANG Qi, NIU Zhi-jun, SUN Jiang-zhong, WU Jian-chun, SUN Han-rong, YOU Xin-zhao. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 32(9): 809-812.
- ZHAO Da-peng. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics[J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 146(1-2): 3-34.
- ZHU Shou-biao, CAI Yong-en, SHI Yao-lin. 2006. The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and its geodynamics implications[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 163(8): 1477-1493.