

文章编号:1001-8166(2005)05-0549-07

地质构造变形数值模拟研究的原理、方法及相关进展^{*}

林 舸¹, 赵重斌^{1,2}, 张晏华^{1,2}, 王岳军¹, 单业华^{1,3}

(1·中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院边缘海地质重点实验室 广东 广州 510640;

2.CSIRO Exploration & Mining, Australia Perth W A 6151;

3·中南大学地质与环境工程学院计算地球科学研究中心 湖南 长沙 430012)

摘 要 地质构造变形数值模拟实验研究是遵循自然科学规律,依据数学、物理学、化学等学科中已为人们认识的规律为原理,依靠计算机先进的综合处理系统,以固体地球科学资料为基础所构建的地质模型为实验研究本体。因而,地质构造变形数值模拟是采用数学物理方法对相关地质学问题的科学描述,并采用理论分析和数值模拟实验方法,对所描述的相关地质学过程进行定量化求解。由于数值模拟可以综合利用其它学科的研究成果,建立和模拟不受时空限制的各种地质模型,为定量地解决一些复杂的地质学问题,提供有效的分析工具,已经引起了国内外地学界的重视和深入研究。数值模拟实验研究方法的发展,将极大地促进我国地学界从采用了多年的传统的描述性研究方法向科学的定量化研究方法的转变。

关 键 词 地质 构造变形 数值模拟 原理方法

中图分类号:P54

文献标识码:A

0 引 言

现今获取和观察到的大量地质信息和实例,都是地质构造演化过程中某一幕或某一阶段的地质表现,是地质构造演化过程最后一幕的综合结果或某一次地质事件的具体产物。然而,早期的地质信息或地质作用所发生的过程可能被后期地质作用所改造、叠加或抹杀。因此,完整地观察或再现地质构造变形演化过程,热—动力驱动和构造变形之间的耦合和叠加关系,俯冲和碰撞带的形成与演化发展,造山带伸展垮塌与陆内裂解作用等事件的演变过程及其内在动力机制显得尤为困难。

传统的地质—地球物理—地球化学理论和分析方法,无疑是再现地质构造变形演化过程的重要手段之一,并已取得长足的发展。由于不同的学者从不同的侧重点来研究地质构造演化的动力学机制,以

及对地质过程理解方面的局限性,这些手段在研究地球动力学机制方面难免存在一定程度的局限性。物理模拟实验可以帮助人们理解构造变形过程和动力学的作用过程,但也存在严重的时空尺度的局限性。数值模拟实验研究可以综合利用其它方法(如地质、地球物理、地球化学)的研究成果,建立和模拟不受时空限制的各种地质模型,而成为现代地球科学研究的重要方法之一。通过地质演化过程的正演模拟,重建地球或一个区域的地质演化过程,从而得到深部动力学与浅部构造响应的重要信息,以帮助人们认识与理解地质构造演化过程。通过数值模拟实验研究,可以理解和认识地质历史时期热动力作用与构造变形之间的耦合与叠置关系,地质历史时期内岩石圈构造、热结构、应力应变场的演变,岩石圈内部不同层次或尺度物质—能量的传输、转换及其调整过程,岩石圈演变与重要构造形迹的形成

* 收稿日期:2004-03-08,修回日期:2004-09-28。

* 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目“主碰撞带地壳挤压增厚和缩短阶段的构造变形和成矿响应”(编号:2002CB412601),中国科学院广州地球化学研究所所长基金项目“壳幔过渡带的形成及揭示的动力学模式”(编号:930513)联合资助。

作者简介:林舸(1948-),男,湖南洞口人,研究员,主要从事大地构造与成矿学研究。E-mail: gelin@gig.ac.cn

过程及其形成机理等。

构造变形数值模拟实验研究的发展主要在于：

它是一种大学科的交叉研究和综合分析研究方法,所涉及到的主要学科包括地质学、地球物理、地球化学、数学、计算力学和计算机技术等。科学上的重大突破新的生长点乃至新学科的产生,往往在相邻学科彼此交叉和相互渗透的过程中形成。特别是地学中“以问题为导向”的研究更体现了这一点^[1]。将常规的广为大地构造学或地质演化过程研究所采用的归纳、演绎的逻辑推测方法,向通过由计算机算法和技术表示的数学逻辑方法推进,从而为综合分析地质资料提供有效的研究方法。同时,也为实现地球动力学研究的创新从理论上和方法上提供可靠的支持。

1 地质构造变形数值模拟的原理与方法

地质构造变形数值模拟实验的基本原理,是遵循自然科学规律,如物质不灭定律、能量守恒定律等;并依据数学、物理学、化学等学科中已为人们认识的基本规律为原理,依靠计算机先进的综合处理系统,并以固体地球科学资料为基础所构建的地质模型为实验研究本体。地质构造变形数值模拟实验研究,不是单纯的数据处理和图像分析,它是采用数学物理方法对相关地质学问题的科学描述,并采用理论分析和数值模拟实验方法,对所描述的相关地质过程进行量化的求解。因而,对能充分反映岩石圈及地壳变形的物理化学过程(如流体流动过程、热传递过程、介质变形过程、热液流体的混合化学反应过程和水岩化学反应过程等)及其相关的基本科学问题的认识 and 知识积累,是探讨地质构造变形等复杂地质学问题的基本前提条件。一般地说,地质构造变形数值模拟实验研究先从简单模型做起,简单的几何形态是数值模拟常采用的方法,能有效地认识一些基本的科学问题,如温度场的改变,导致流体的对流及含矿热液系统化学反应的发生,再现成矿物质的溶解与沉淀过程。由于地质学问题的复杂性,即使对这些具有简单几何构形,但能充分反映影响岩石圈及地壳变形的基本问题的求解,采用纯数学分析的方法常常也是不太可能的。因此,研究和发展高级数值计算方法,及数值模拟技能的积累无疑也是为解答上述的这些基本科学问题进行求解和探讨地质构造变形而不可缺少的研究内容。

为了探讨地质构造变形,必须深入研究与岩石圈及地壳变形机制相关的基本科学问题。如孔隙流

体在岩石圈及地壳中的对流,这一对流作用可导致类似地幔柱式的地温重分布,由于组成岩石圈及地壳的材料强度随温度变化而变化,而这一变化又可导致组成岩石圈及地壳材料的屈服破坏。因而,这种地温的重分布无疑又对地壳的构造变形有着极为重要的影响。又如在岩石圈及地壳中发生的不同流体的混合化学反应及水岩化学反应,这些化学反应可导致岩石圈及地壳中骨架材料的溶解或沉积,这种由于化学反应引起的溶解或沉积作用,又将改变岩石圈及地壳中骨架材料的结构及孔隙分布,从而明显地改变岩石圈及地壳材料的强度及传热特性,无疑又将导致组成岩石圈及地壳材料的屈服破坏,结果也是严重地影响岩石圈及地壳的构造变形。由此可见,为了深入地研究和探讨构造变形问题,我们必须对诸如上述的一些基本科学问题进行深入的探讨。为了实现这一目标,我们需要对一些能反映这些基本科学问题的概念和理论模型进行详细的研究。

构造变形数值模拟实验研究的研究方法,主要包括三大部分:一是建立科学的高级数值计算算法,这是数值模拟实验研究的核心。只有依据现已为人们所发现和认识的自然科学规律建立的数学物理方程组,才有可能量化模拟相关的地质学过程,并逐步将地质科学纳入定量的科学理论范畴。由于问题的复杂性,有限元和有限差分是解决这类耦合问题最有效的方法;二是将建立的高级数值计算算法转换成计算机语言,这一部分工作将主要由计算机方面的专家来做;三是依据已有的地质资料,以观察到的地质现象为依据,选择参数进行数值模拟实验研究。

依据观测或推测的边界条件、实验参数,来建立实验研究的初始条件、边界条件,并不断修正、更改实验参数、初始条件、边界条件进行模拟实验,逐步使实验结果趋近于或等于观察到或科学推测的地质构造模型。从数学理论和方法上证实或证伪已有的地质模型,建立符合区域地质实况的地质构造模式。因此,综合分析已有资料,构建合理的地质模型,从不同方面选择实验研究的初始条件、边界条件及实验参数,并选择不同的数学模型进行实验研究,并从地质、地球物理、地球化学等方面提供约束条件,限制实验结果的多解性,并使实验结果趋近于地质现状,是数值模拟的主要研究内容与方法。

2 国外地质构造数值模拟研究的现状

基于数值模拟研究的优越性,近 20 年,那些已

在传统构造地质学、成矿学、大地构造学研究领域卓有成就的专家、学者,如澳大利亚的 Bruce Hobbs,英国的 England, Houseman,德国的 Cee Pashan,加拿大的 Paul Williams,瑞士的 Neil Mandkeltow 等,都已致力于数值模拟方面的研究;目前许多国家(如美国、加拿大、英国、法国、德国、日本、瑞士、澳大利亚)也都相继建立起计算机模拟研究实验室或研究中心。国外研究者相继利用数值模拟手段研究了碰撞与碰撞后过程深部动力学机制、浅部响应和远程地质构造间的热应力传输与耗损过程、板块俯冲对俯冲带热动力的调整及其对岩浆作用源区性质、俯冲带变形特征及大陆增生等的影响、大陆俯冲—陆陆碰撞过程下插板片断离作用的成因机制及其对同碰撞和碰撞后岩浆作用与大陆构造变形的影响与制约作用、陆内岩浆作用与伸展构造、多陆块相互作用与侧向构造逃逸间耦合作用机制、岩石圈变形—温度—流体相互作用机制等,如 Botti^[2]模拟了板缘力驱动下板内应力应变的演化, Tapponnier^[3]对板块俯冲过程及俯冲带中变形的研究, McKenzie^[4]对大陆引张和盆地形成过程的模拟, England 等^[5]在 1982 年首次将黏性薄层流变模型运用到以印度板块和欧亚板块的碰撞为代表的大陆形变,在一矩形区域内对青藏高原的挤压隆升演化进行了数值模拟; Houseman 等^[6-8]成功模拟了印度板块和欧亚板块碰撞后板块边缘变形与地幔对流之间的耦合关系,他们的实验研究结果表明:地壳厚度变化是调整碰撞动力学环境变化的主要地质构造效应,走滑剪切断裂只是部分地缓解了这种应力场的变化,地壳厚度变化产生的向上浮力,导致陆块间的侧向运行和地壳厚度变化。Zhang 等^[9,10]用模拟手段成功地解释了澳大利亚东部的岩石圈构造和异常应力场的成因,澳大利亚东部被动板缘或陆/洋壳交接带,有一高密度区指向大陆的上地幔楔,正是这一高密度区的存在,导致了澳大利亚东部的岩石圈构造和异常应力场的发生和地壳构造运动。Zhao 等^[11]用变形—流体—热力学—化学反应全耦合的模拟方法实现对构造控矿理论的研究和找矿勘探的应用。

国际上近几年的研究表明,构造变形动力学数值模拟研究的方法是成熟的。目前的发展主要在数学公式的推导与高级计算机算法的设计,并主要利用有限元和有限差分方法。模拟研究也充分考虑到岩石圈的特性,加强了在流变学理论方面的研究,更大程度上考虑到实际地质现况。近几年,国外研究者对能充分反映岩石圈及地壳变形的基本物理化学

过程(如流体流动过程、热传递过程、介质变形过程、热液流体的混合化学反应过程和水岩化学反应过程等)及其相关的基本地质科学问题的认识和发展高级数值计算方法,进行了初步研究。澳大利亚的 Zhao 等^[12]在近几年来,已研究和开发了可用于求解岩石圈及地壳中介质变形过程、流体流动过程、热传递过程、热液混合化学反应和水岩化学反应过程的一些高级计算机算法,利用简单的几何模型进行了一些有效的研究工作,为量化地解决许多复杂的地质学问题,提供了新的思路和研究方法。

3 地质构造变形数值模拟研究在我国的进展

近几年,我国地质学者采用不同的方法,在构造变形动力学数值模拟研究方面做了一些工作,并有一批成果报道^[13-25]。其中,宁杰远等^[13]对俯冲带波速结构的数值模拟;毛兴华等^[14]根据弹性本构关系,用平面应变有限元方法计算了相变引起的体积变化、板块内部温度差、密度异常及边界力产生的应力场分布情况,对俯冲带深部应力场开展了二维弹性有限元数值模拟,张贵宾等^[15]利用中英合作完成的有限元粘弹塑构造数值模拟技术 FEVPLIB,模拟研究了青藏高原西部横过西昆仑和塔里木结合带剖面的这一动力学演化过程;何丽娟^[16]采用粘弹性动力学模型模拟研究了岩石圈流变性对拉张盆地构造热演化的影响。李祖宁等^[17]将印度板块持续地向北推进、下伏地幔小尺度对流对增厚大陆岩石层的搬离作用以及剥蚀作用视为形成现今东亚大陆形变和应力场格局的主驱动力,在一梯形区域内,利用数值模拟的方法,研究了东亚大陆在不同的边界条件、不同的剥蚀率系数及不同的岩石力学参数条件下的形变及应力场格局。青藏高原的隆升及其动力学机制,一直是地球科学家关注的热门课题。李祖宁等^[18]修改了 England 和 McKenzie 的黏性薄层流变模型中控制大陆形变的连续性方程,将剥蚀作用对高原隆升演化的影响直接引入该方程,并考虑下伏地幔小尺度对流对增厚岩石层的搬离作用对高原隆升演化后期的影响,用有限差分法直接模拟青藏高原隆升过程。数值模拟结果所显示的高原隆升演化过程与实际观测资料吻合较好,揭示了高原隆升演化过程的非平稳和多阶段的特性。毕思文^[19]根据山地系统岩石圈运动的主要因素—构造带和断裂带,应用变形体模拟构造带,采用摩擦模型模拟断裂带,并根据周边位移情况给出边界条件。

应用 ABAQUS 有限元分析软件和位移加载,开展了青藏高原山地系统岩石圈应力—位移场的数值模拟分析,给出了应力和位移的分布规律。

中国科学院广州地球化学研究所地质构造变形数值模拟实验研究小组,近年来与国外学者进行合作研究,初步地研究了岩石圈与地壳中流体对流的可能性,揭示了流体对流在岩石圈及地壳中发生的基本前提条件。尽管地学界通过岩石探针,从物质成分分析对比,普遍认为在岩石圈板块中存在着大规模的对流。但是并不完全清楚在不同的边界条件下,对流在岩石圈及地壳中发生的基本前提条件。通过对岩石圈及地壳不同尺度的流体对流过程的理论分析和数值模拟研究,已认识到,岩石圈与地壳中流体对流对岩石圈及地壳中的应力分布及其演化过程有着极为重要的影响。岩石圈及地壳在不同的边界条件下,本身具有一个“系统临界地温温度梯度”,当岩石圈及地壳中的实际地温温度梯度大于或等于这一相关的“系统临界地温温度梯度”时,对流就可能在岩石圈及地壳中发生^[26~37]。这一科学认识从根本上揭示了流体对流在岩石圈及地壳中发生的基本前提条件,对探讨华北中生代岩石圈减薄的动力学机制有着非常重要的理论指导意义。

地质构造变形数值模拟实验的主要内容之一是研究构造应力与构造变形,即应力与应变的关系问题。因此,开展构造地质基础的数值模拟实验,是地质构造变形数值模拟实验的主要内容之一。同时,数值模拟不但可以在华北、华南陆块这类板块尺度大区域的实验研究,而且对矿区这类小尺度的实验研究同样也是有效的研究方法。在构造地质学的基础理论方面,数值模拟还可重点围绕着应力反演(stress inversion)和构造复原(restoration),以及褶皱/断裂构造导致流体的运移、集中、混合和沉淀富集开展有关的创新性研究。

应力反演法是利用断层数据来反演当时原地古应力状态的一种方法。目前已提出的多种方法都带有不同程度的局限性,表现为它们一般不能够有效地区分开不同构造期的断层数据,从而导致错误的应力估计。这种局限性的产生原因主要在于应力反演问题的非线性。然而,经过简单的非线性变换,在 Fry^[38] 提出的特征空间(σ space)里,应力反演问题可以转变为线性问题,即同构造期断层数据的分布呈现出统一的超平面,而不同构造期断层数据的分布呈现出不同的超平面。在此基础上,引入模糊线性聚类方法,不仅考虑到数据测量误差给应力

估计带来的不确定性,而且还能够根据观察数据的内在特征合理地确定出最佳的构造期数目^[39~43]。构造复原或恢复是构造地质学中研究构造变形场的一种重要手段。通常的做法属于不连续恢复,即先将离散的有限单元去应变,然后再拼贴所有的去应变单元,最终得到复原的结果。这种人为的分步计算的不足在于复原结果往往取决于所采用的拼贴方案,要求输入较多的控制参数,且算法不易编程实现。基于有限元分析,提出的连续恢复算法,能够较好地克服以上的不足之处。目前,已将它运用到裂谷盆地三维断裂构造面的复原,探讨花岗岩侵入体的侵位空间和侵位机制^[44~46]。小构造(褶皱、断裂、节理等)的活动,与成矿过程具有密切的联系。对褶皱/断裂活动导致的变形场的模拟显示,褶皱/断裂活动造成的位移场均可导致形应变和体应变(岩石体积增加)在褶皱轴部或断裂尖端附近集中,并进一步引起岩体渗透率的增加和流场压降的降低,导致成矿流体在这些位置运移、集中、混合、沉淀富集,构造运动及其对流体—成岩/成矿耦合作用的数值模拟结果显示,在不同的构造环境下,成矿流体的流速、流线和温度分布,成矿元素的溶解和沉淀类型及分布区域存在着明显的差异,成矿流体的混合反应是成矿作用的重要机制之一^[47~49]。

研究组分别运用 FLAC 软件和薄席片粘性模型,研究了可能导致华北中生代岩石圈减薄的动力学过程。研究结果显示,在块体挤压应力引起的岩石圈/地壳加厚背景下,重力伸展—垮塌作用是导致华北陆块盆地体系形成的重要因素。热—应力模拟表明,热侵蚀作用是导致厚且冷的克拉通岩石圈减薄的主导因素,而机械伸展引起的减薄幅度有限,华北陆块中生代岩石圈减薄的过程是地热热流与应力共同作用的结果^[50,51]。该项成果的创新主要在 3 个方面:地球热力学模拟本构方程的建立。本研究建立的模型全面考虑了岩石圈热传导特性,岩石放射性生热的能力以及源自地幔深处的热流的影响。这在国际上现时进行的地球热力学研究中,是同行公认的较全面的数值建模方案。引导出的模型能真实地反映岩石圈的热演化。本研究对热侵蚀减薄和机械构造伸展减薄进行了综合考虑和耦合模拟。国际上类似的模型多将两种机制单独考虑。因此,本模型较真实地再造大地构造事件的实际过程。对华北岩石圈的减薄过程进行了初步的定量描述。这种定量的结论代表着对推理性的、模糊的华北热构造事件常规描述的进一步的认识。

4 问题与讨论

我国在大陆地质构造变形动力学数值模拟研究方面的工作虽已经开始,但只能说还在探索阶段。在碰撞与碰撞后过程深部动力学机制、俯冲带形变特征及大陆增生等的影响、大陆俯冲—陆陆碰撞过程下插板片断离作用的成因机制及其对同碰撞和碰撞后岩浆作用与大陆构造变形的影响与制约作用、陆内岩浆作用与伸展构造、多陆块相互作用与侧向构造逃逸间耦合作用机制等数值模拟研究方面,尚未开展深入研究。一方面是我们起步晚,另一方面是尚未能真正认识到数值模拟研究的重要性及其可能的前景。

由于地质学问题的复杂性,要对哪些具有简单几何构形,但能充分反映影响岩石圈及地壳变形的基本科学问题的求解,必须研究和发展高级数值计算方法。这就需要大学科的交叉和科学家们的合作,特别需要数学家、物理学家和化学家的参与。如果地质学家想用一组数理方程式来描述岩石圈及地壳变形的过程,没有数学家、物理学家和化学家的参与几乎是是不可能的。有了他们的参与,加上地质学家对地质科学资料的积累和认识及其正确的逻辑思维方法,利用的现代高科技手段,研究和发展一些高级计算机算法,为量化地解决许多复杂的地质学问题,甚至用一组数理方程式来描述岩石圈及地壳变形的过程,也不是不可能的。

参考文献(References):

- [1] Sun Chengquan, Qu Jiansheng. Status and trends of the international Earth sciences studies [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(3): 344-347. [孙成权, 曲建升. 国际地球科学发展态势[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 344-347.]
- [2] Bott M H, Dean D S. Stress systems at young continental margins [J]. *Nature*, 1972, 235: 23-25.
- [3] Tappinonier P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics [J]. *Nature*, 1976, 264: 319-324.
- [4] McKenzie D P. Some remarks on the movement of small melt intractions in the mantle [J]. *Earth Planet Sciences Letter*, 1989, 95: 53-72.
- [5] England P C, McKenzie D A. Thin viscous sheet model for continental deformation [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1982, 70: 295-321.
- [6] Philip England, Gregory Houseman. Role of Lithospheric strength heterogeneities in the tectonics of Tibet and neighbouring regions [J]. *Nature*, 1985, 315(6017): 297-301.
- [7] England P, Houseman G A. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1989, 94: 17 561-17 579.
- [8] Gregory Houseman, Philip England. A Crustal-Thickening Model for the Ind-Asian Collision [M]. Los Angeles, USA, the Rubey Colloquium -Tectonic Evolution of Asia, 1994.
- [9] Zhang Y, Scheibner E, Ord A et al. Numerical modelling of crustal stresses in the eastern Australian passive margin [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1996, 43: 161-175.
- [10] Zhang Y, Scheibner E, Hobbs B E, et al. Lithospheric structure in SE Australia: A model based on gravity, geoid and mechanical modeling [A]. In: Braun J, Dooley J, Goleby B, et al, eds. *Structure and Dynamics of the Australian lithosphere* [C]. AGU Monograph, Geodynamics Series, 1998, 26: 89-108.
- [11] Zhao Chongbin, Hobbs B E, Mihalas H B. Finite element modelling of temperature gradient driven rock alteration and mineralization in porous rock masses [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, 165: 175-187.
- [12] Zhao Chongbin, Hobbs B E, Mihalas H B, et al. Numerical modelling of double diffusion driven reactive flow transport in deformable fluid-saturated porous media with particular consideration of temperature-dependent chemical reaction rates [J]. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software: Engineering Computations*, 2000, 17: 367-385.
- [13] Ning Jieyuan, Zang shaoxian. Numerical Simulation of P-wave velocity structure of subduction zones [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(2): 190-198. [宁杰远, 臧绍先. 俯冲带波速结构的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(2): 190-198.]
- [14] Mao xinhua, Liu Yaqing, Ye Guoyang, et al. 2-D elastic FEM simulation on stress state in the deep part of a subducted slab [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(3): 277-284. [毛兴华, 刘亚静, 叶国扬, 等. 俯冲带深部应力场的二维弹性有限元数值模拟[J]. *地震研究*, 2002, 24(3): 277-284.]
- [15] Zhang Guibin, Martin H P. Modelling the evolution of a half graben basin using elastoviscoplastic finite element analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 442-448. [张贵宾, Martin H P. 半地堑盆地演化机制的粘弹塑性数值模拟[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 442-448.]
- [16] He Lijuan. Effects of lithospheric rheology on thermal-mechanical modeling of extension basins [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(1): 49-55. [何丽娟. 岩石圈流变性对拉张盆地构造热演化历史的影响[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(1): 49-55.]
- [17] Li Zuning, Fu Rongshan, Zheng Yong, et al. Evolution of the deformation and stress patterns of the East Asia continent under multi-driving force [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(1): 17-26. [李祖宁, 傅容珊, 郑勇, 等. 多种驱动力作用下东亚大陆形变及应力场演化[J]. *地震学报*, 2002, 24(1): 17-26.]
- [18] Li Zuning, Fu Rongshan, Huang Jianhua. Numerical simulation of the Qinghai-Xizang Plateau uplift under the effect of denudation and mantle convection [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(4): 516-524. [李祖宁, 傅容珊, 黄建华. 剥蚀及地幔作用下青藏高原隆升过程的数值模拟[J]. *地球物理学报*,

- 2002, 45(4): 516-524.]
- [19] Bi Siwen. Study on dynamic numerical simulation of mountain system in Tibet Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(4): 289-298. [毕思文·青藏高原山地系统动力学数值模拟研究[J]. *山地学报*, 2001, 19(4): 289-298.]
 - [20] Fu Rongshan, Xu Yaomin, Huang Jianhua, et al. Numerical simulation of the compression uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(3): 346-355. [傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 等. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 346-355.]
 - [21] Fu Rongshan, Huang Jianhua, Xu Yaoming, et al. Numerical simulation of the collision between Indian and Eurasian plates and the deformations of the present Chinese continent [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(1): 1-7. [傅容珊, 黄建华, 徐耀民, 等. 印度与欧亚板块碰撞的数值模拟和现代中国大陆形变[J]. *地震学报*, 2000, 22(1): 1-7.]
 - [22] Zhu Jieshou. Structure of lower mantle and core-mantle boundary region and its geodynamics [J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(2): 139-142. [朱介寿. 下地幔及核幔边结构及地球动力学[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(2): 139-142.]
 - [23] He Lijuan. Advance in tectono-thermal modelling of sedimentary basins [J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(6): 661-665. [何丽娟. 沉积盆地构造—热演化模拟的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 661-665.]
 - [24] Zhu Jieshou, Cao Jianmin, Cai Xuebin, et al. Study for three-dimensional structure of Earth interior and geodynamics in China and adjacent sea areas [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(4): 497-503. [朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 中国及邻区陆域海域地球内部三维结构及动力学研究[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 497-503.]
 - [25] Zheng Guizhou, Shen Yongli. 3-D analysis of geological characteristics and status research of 3-D geology modeling [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(2): 218-223. [郑贵州, 申永利. 地质特征三维分析及三维模拟现状研究[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(2): 218-223.]
 - [26] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Finite element modelling of three-dimensional convection problems in fluid-saturated porous media heated from below [J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2001, 17: 101-114.
 - [27] Chongbin Zhao, Ge Lin, Hobbs B E, et al. Finite element modelling of heat transfer through permeable cracks in hydrothermal systems with upward throughflow [J]. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software: Engineering Computations*, 2001, 18(7~8): 996-1011.
 - [28] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Computer simulations of coupled problems in geological and geochemical systems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, 191: 13137-13152.
 - [29] Chongbin Zhao, Ge Lin, Hobbs B E, et al. Finite element modelling of reactive fluids mixing and mineralization in pore-fluid saturated hydrothermal/sedimentary basins [J]. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software: Engineering Computations*, 2002, 19(3): 364-387.
 - [30] Ge Lin, Chongbin Zhao, Hobbs B E, et al. Theoretical and numerical analyses of convective instability in porous media with temperature-dependent viscosity [J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2003, 19: 787-799.
 - [31] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Convective instability of three-dimensional fluid-saturated geological fault zones heated from below [J]. *Geophysical Journal International*, 2003, 155: 213-220.
 - [32] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Ord A, et al. Effect of material anisotropy on the onset of convective flow in three-dimensional fluid-saturated fault [J]. *Mathematical Geology*, 2003, 35(2): 141-154.
 - [33] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Ord A, et al. An equivalent algorithm for simulating thermal effects of magma intrusion problems in porous rocks [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192: 3397-3408.
 - [34] Chongbin Zhao, Ge Lin, Hobbs B E, et al. Effects of hot intrusions on pore-fluid flow and heat transfer in fluid-saturated rocks [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192: 2007-2030.
 - [35] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Finite element modelling of three-dimensional steady-state convection and Lead/Zinc mineralization in fluid-saturated rocks [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2003, 3(1): 73-89.
 - [36] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Finite element modelling of rock alteration and metamorphic process in hydrothermal systems [J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2001, 17: 833-843.
 - [37] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Analysis of steady-state heat transfer through mid-crustal vertical cracks with upward throughflow in hydrothermal systems [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26: 1477-1491.
 - [38] Fry N. Striated faults: Visual appreciation of their constraint on possible paleostress tensors [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21(1): 7-22.
 - [39] Yehua Shan, Hongbin Sun, Ge Lin. Separation of polyphase fault/slip data: An objective-function algorithm based on hard division [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(6): 829-840.
 - [40] Yehua Shan, Ge Lin, Zhan Li, et al. A simple stress inversion of fault/slip data assuming Andersonian stress state [J]. *Journal of Geophysics Research*, 2004, 109: B04408.
 - [41] Yehua Shan, Zhan Li, Ge Lin. A stress inversion procedure for automatic recognition of polyphase fault/slip data sets [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(5): 919-925.
 - [42] Shan Yehua, Li Zhan, Lin Ge. A method for determining the history of faulting using the model of fault displacement [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(1): 93-96. [单业华, 李自安, 林炯. 利用断层位移模式确定断层发育史的一种方法[J].

- 石油实验地质, 2003, 25(1): 93-96.]
- [43] Shan Yehua, Li Zian, Lin Ge. A stress inversion procedure for automatic recognition of polyphase fault/slip data sets[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(2): 181-186. [单业华, 李自安, 林炯·自动识别多期断层擦痕的一种应力反演算法[J]. 地球学报, 2003, 24(2): 181-186.]
- [44] Yehua Shan, Ge Lin, Zian Li, et al. Continuous restoration of deformed shapes through the construction of a reverse displacement gradient and its application to granite emplacement in central North China [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(1): 71-85.
- [45] Yehua Shan, Ge Lin, Zian Li. An inverse method to determine the optimal stress from imperfect fault data[J]. Tectonophysics, 2004, 387(1-4): 205-215.
- [46] Shan Yehua, Sun Hongbin, Li Zian, et al. Restoration of 3-D deformed surfaces [J]. Petroleum Exploration & Development, 2002, 29(5): 37-40. [单业华, 孙虹斌, 李自安, 等·三维构造面的连续性恢复[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 37-40.]
- [47] Zhang Y, Hobbs B E, Ord A, et al. The influence of faulting on host-rock permeability, fluid flow and ore genesis of gold deposits: A theoretical 2D numerical model [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003 (78-79): 279-284.
- [48] Chongbin Zhao, Hobbs B E, Muhlhaus H B, et al. Finite element modelling of rock alteration and metamorphic process in hydrothermal systems [J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2001, (17): 833-843.
- [49] Lin Ge, Zhao Chongbin, Wang Yuejun, et al. The numerical modelling of the reactive fluids mixing and the dynamic equilibrium of mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2): 275-282. [林炯, Zhao Chong-bin, 王岳军, 等·含矿流体混合反应与成矿作用的动力平衡模拟研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 275-282.]
- [50] Ge Lin, Yanhua Wang, Feng Guo, et al. Geodynamic modelling of crustal deformation of the North China block: A preliminary study [J]. Journal of Geophysics Engineering, 2004, (1): 63-69.
- [51] Ge Lin, Zhang Yanhua, Wang Yuejun, et al. Lithospheric thinning in the North China Block: A numerical approach on thermal perturbation and tectonic extension [J]. Geotectonica & Metallogenia, 2004, 28(1): 8-14. [林炯, Zhang Yan-hua, 王岳军, 等·华北陆块岩石圈减薄作用: 热薄化与机械拉伸的数值模拟研究[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 8-14.]

THE PRINCIPLE, METHOD AND RELATED RESEARCH PROGRESS ON THE NUMERICAL MODELING OF GEOLOGICAL STRUCTURAL DEFORMATION

LIN Ge¹, ZHAO Chong-bin^{1,2}, ZHANG Yan-hua^{1,2}, WANG Yue-jun¹, SHAN Ye-hua^{1,3}
(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China, 2. CSIRO Division of Exploration and Mining, Perth, Australia WA 6151, 3. Computer Geoscience Research Center, Central South University, Changsha 430012, China)

Abstract: The numerical modeling of geological structural deformation is based on the related scientific laws and principles, which have been well recognized in the fields of mathematics, physics, chemistry and so forth. By making use of the advanced computer technology and numerical analysis algorithms, the geological model used in the numerical modeling is also based on the available scientific database coming from the solid Earth. Therefore, the essence of the numerical modeling of geological structural deformation is to adopt the well-established numerical methods of multidisciplinary knowledge including mathematics, physics and mechanics to solve the relevant geological problems scientifically. Because it can synthetically combine the achievements in other disciplines, the numerical modeling has become a useful tool worldwide in the fields of geosciences. In addition, there are no time-space limitations for all sorts of geological models. The numerical modeling is an effective method to quantitatively solve most complicated geological problems. This will promote the revolution of the research methods from the traditional description methods that have been adopted for many years to the scientific and quantitative methods in the geosciences of China.

Key words: Geology; Structural deformation; Numerical model; Principle and method; Research progress.