

用二维有限元方法研究青藏地块地壳水平运动^{*}

蒋锋云, 张 希, 张晓亮, 王双绪, 耿晓民

(中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

摘要: 对 1998~2003 年青藏高原地区高精度 GPS 水平速度场成果进行参考框架的变换, 获得了扣除刚性运动后的反映区域内部相对运动的水平速度场。进一步借助二维有限元技术, 结合最优化原理, 将变换框架后的 GPS 测点位移作为约束, 反演区域块体边界分段位移。利用反演获得边界位移重建区域内部均匀、统一的变形场, 并计算其应变率场、面膨胀率场。最后, 对地质构造区域地壳变形及应变率场与强震发生部位的对应关系进行了分析。

关键词: 青藏地块; GPS 二维有限元; 最优化; 强震

中图分类号: P542⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)03-0283-06

0 前言

近年来, 由于空间测地技术的飞速发展, 利用各种卫星资料得到的高精度地壳运动数据为研究地壳运动提供了前所未有的广阔空间。其中, 最有效、最直接、最方便的 GPS 观测技术获得了广泛的应用。作为地壳运动的典型区域之一, 青藏高原受到许多研究部门的重视。研究人员布设了大量的 GPS 站点, 并进行了多个时段的观测, 获得了大量高精度地壳水平运动资料。许多专家、学者利用这些资料, 借助各种数学方法, 做了大量的研究(王庆良等, 2002; 张培震等, 2003; 甘卫军等, 2004; 李延兴等, 2004; 张晓亮等, 2004; 江在森等, 2006; 蒋锋云等, 2007)。在众多的数值模拟方法中, 有限元方法能够细化模型, 研究局部的块体运动变形特征, 更可能解决用解析方法难以处理的几何问题及材料非均匀性问题。本文中, 我们结合 GPS 大地水平观测资料来研究和探讨用二维有限元技术提取地震前兆的相关方法和问题。

在利用 GPS 速度场, 借助有限元技术研究地壳水平运动时, 边界条件往往很难确定。为使建立的有限元模型在数学上保持稳定, 通过扣除区

域块体的刚性运动, 得到反映区域内部相对运动的 GPS 速度场, 然后用这个速度场研究区域地壳水平运动, 这样模型就不会产生平移和旋转, 我们就能够相对方便地确定模型边界约束。

基于力学模式的大地测量反演是在选择力学模式和一定的边界条件下, 利用有限元等数值计算方法, 以位移等观测值与相应点计算值之差的平方和趋于最小为准则, 来反求待定参数的方法(独知行, 卢秀山, 2003)。这个反演系统主要包含两个部分: ① 力学模型求解部分。从力学角度看, 力学模型求解问题实际是边值问题。大地测量反演问题所考虑的力学模型多为非线性的, 预测数据与模型参数具有非线性关系。② 目标函数拟合部分。目标函数采用最小二乘拟合, 属于非线性优化问题。这些特点决定了基于力学模式的大地测量反演属于非线性反演问题, 同时也决定了它的研究内容和方法的特殊性。

笔者结合以上两个方面, 利用高精度 GPS 地壳水平运动速度场成果, 通过消除区域刚性运动获得反映青藏高原内部相对运动的速度场。在理想假设的基础上, 借助二维有限元技术构建该区平面二维线弹性有限元模型。根据最优化原理, 将消除刚性运动后的 GPS 速度场作为内部约束条件, 反演青藏块体边界分段位移, 重构统一、均

^{*} 收稿日期: 2008-03-13.

基金项目: 中国地震局预测研究所项目“青藏块体东北部强震孕育一发生动态过程研究”资助。

匀的内部变形场，揭示其与构造及强震孕育之间的关系。

1 资料概况

本文所用资料为由赖锡安等（2004）主编的《中国大陆现今地壳运动》一书中发表的 1998 ~ 2003年中国大陆 20° ~ 41°N 74° ~ 107°E范围内所有 GPS测站速度场（图 1）。

如图 1所示，我们共选取了青藏高原及其周围 471个 GPS站点的速度资料。这些站点包括塔里木地块的站点，阿拉善南部的一些站点，鄂尔多斯西缘的部分站点，华南地块西缘的部分站点，川滇地块外围云南西南部的一些站点。可以看出：① GPS站在空间分布上具有明显的不均匀性，绝大部分都分布在南北地震带和祁连山地块上，其他地方站点则相对稀少，但站点分布基本上还是能反映整个青藏高原的整体运动形态。② 90°E经线以东的 GPS站点以向北运动为主，以西的站点向北东—北东东—东西—东东南方向做顺时针旋转运动。③ 站点运动速率由南向北、从西向东呈明显的减小趋势。

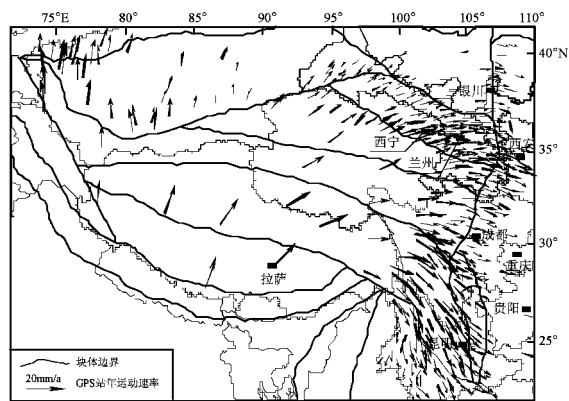


图 1 青藏高原及周围相对欧亚板块 GPS速度场（1998 ~ 2003 年）
Fig 1 GPS velocity field of the Qinghai-Tibet plateau relative to Eurasia Plate (1998—2003)

2 参考框架的变换

在分析 GPS区域水平位移资料时，参考框架的选取理论上不影响对区域内部水平差异运动的

分析结果，但在实际应用中会在一定程度上掩盖和模糊差异构造变形的许多细节，从而影响人们对问题的直观分析（甘卫军等，2004）。因此，选取适当的参考框架，消除区域整体平移和旋转，有利于突出区域相对运动，反映区域内部块体相对变形特征。因此我们将研究区域看作刚体，利用欧拉定理求出块体在球面上的欧拉旋转矢量，然后用相对于欧亚板块的 GPS速度场减去利用欧拉矢量反算得到的整个区域的块体刚性水平运动，从而得到反映块体内部相对变形的地壳水平运动速度场。

用测站地心直角坐标系计算块体欧拉旋转矢量的公式为

$$\begin{bmatrix} V_n \\ V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \lambda & -R \cos \lambda & 0 \\ -R \sin \varphi & -R \sin \varphi \sin \lambda & R \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， V_n 、 V_e 为测站南北向和东西向速率， R 为地球半径， λ 为经度， φ 为纬度。 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为块体欧拉旋转矢量。知道块体欧拉旋转矢量，就可以求出块体上任意一点的刚性运动。用 GPS观测得到的速度场减去刚性运动就得到反映块体内部相对运动的速度场（图 2）。

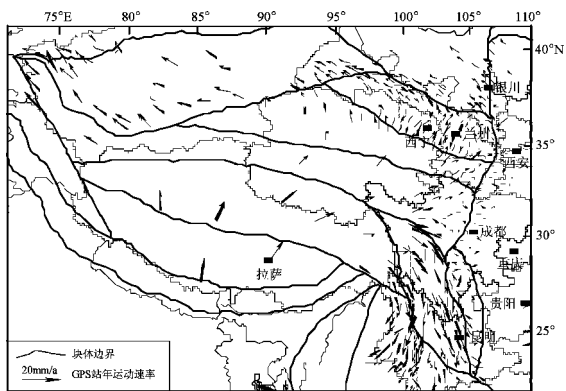


图 2 扣除刚性整体运动后青藏高原及周围 GPS速度场（1998 ~ 2003 年）
Fig 2 Relative horizontal movement GPS velocity field inside the Qinghai-Tibet block (1998—2003)

由图 2可以看出：① 鄂尔多斯地块和华南地块阻挡了物质向东运移的通道。以玛尼—玉树—鲜水河断裂为界，界线以北的青藏高原东北部受

鄂尔多斯地块的东向阻挡和阿拉善地块的北向阻挡呈逆时针向西运动, 并无明显的东向逃逸。界线东南部受华南地块的阻挡, 表现为绕喜马拉雅东构造结的挤出式顺时针“滑流”, 这一流带前缘速度场在青藏高原东南角呈现出扇形发散特征。青藏高原的中西部区域, 仅有个别分布不均匀的 GPS 站点, 但这些站点速度矢量的东西向分量比较小, 说明该区域的东向挤出趋势已非常微弱。因此这一流滑带的起始位置大约在青藏高原中西部, 并未一直向西延伸而贯穿整个青藏高原。② 玛尼—玉树—鲜水河断裂和海原断裂之间的青藏高原东北部区域总体上表现出左旋运动特征, 但这种运动在青藏高原东缘的龙门山一带已不再明显。③ 海原断裂带、阿尔金断裂带、东昆仑断裂带及玉树—鲜水河断裂带两侧的速度场显示出明显的差异, 反映出这 4 条断裂带现今明显的活动性。④ 青藏高原南部较大的北向会聚速度分量, 在昆仑地块及以北地区大幅度减小。这表明, 青藏高原所承受的南北向强烈挤压, 主要由喜马拉雅、拉萨和羌塘地块的缩短和隆升所吸收。

3 GPS资料的有限元反演

本节中, 我们将建立青藏高原地壳水平运动的二维线弹性有限元模型, 利用消除青藏高原整体运动之后的区域内部水平运动场, 结合最优化原理, 反演青藏块体边界分段位移, 再造相对于青藏高原内部地壳运动的水平速度场, 并计算应变率场。

3.1 有限元模型的建立及边界分段

张培震等 (2004) 将青藏地块划分为 7 个块体: 祁连地块、柴达木地块、昆仑地块、羌塘地块、拉萨地块、喜马拉雅地块和川滇地块 (图 3)。笔者依据上述活动地块的划分来建立有限元模型。块体之间用 5 km 宽的相对较软的弹性物质填充, 弹性模量取 20 000 MPa, 泊松比取 0.28。其他地方用较硬的弹性物质填充, 弹性模量取 88 000 MPa, 泊松比取 0.25。用 6 节点三角形二次单元来划分网格。划分单元时将研究区向外延伸 100 km 以消除边界载荷不连续所造成的应力集中、局部变形过大等非正常变形。此外, 根据研究区及外围扣除刚性运动之后的水平速度场以及该区地质

构造条件, 将研究区划分为 11 个分段, 除西北角上的边界为自由边界外, 其他用数字标明的 1~10 段边界根据外围 GPS 站点速度, 给定 x 、 y 方向的初值 (图 4)。

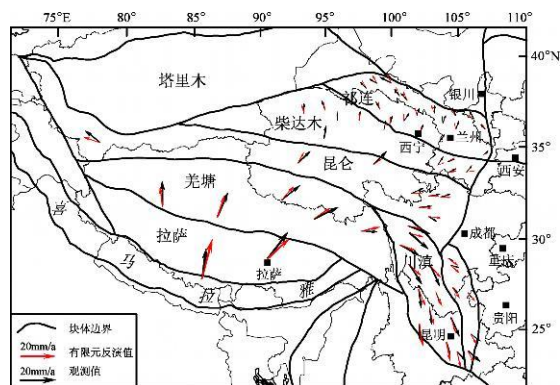


图 3 反演所得速度和实际观测所得速度
Fig. 3 Comparison between inversed velocity and the observed one

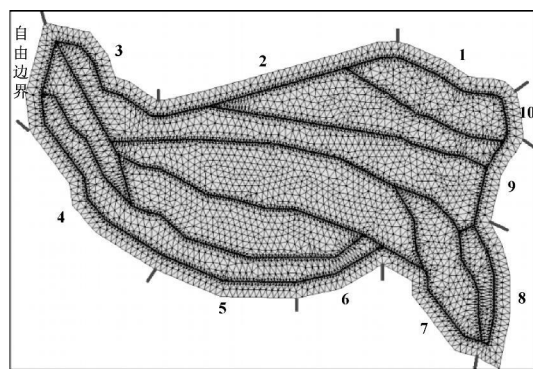


图 4 青藏块体二维有限元模型网格划分及边界分段
Fig. 4 Grid model and segmental boundary of the Qinghai-Tibet block

3.2 拟合站点的选取及拟合条件

为了突出研究区域内部的整体变形, 我们将扣除区域刚性整体运动后反映区域内部相对运动的 GPS 水平速度观测点作为拟合点, 并从扣除区域刚性整体运动后的 GPS 水平速度场中筛选出相对运动统一、分布广泛的能反映区域内部整体变形的 62 个 GPS 站点 (图 3), 作为拟合点反演区域分段边界位移。选取拟合站点时, 对于站点较少的块体, 选取全部站点; 对于站点较多的块体, 为了突出块体的整体运动特征, 我们舍弃了一些和块体整体运动态势不太一致的站点, 对于站点

密集的块体，在保证能反应块体整体运动形态的条件下，为了减少计算量，我们也做了大量删减，这些删减对反演边界条件影响不大。

根据最优化设计原理（独知行，卢秀山，2003），我们将区域边界分段位移作为优化设计变量，以此来确定目标函数，并使其最小。用GPS水平观测速度场来反演区域边界位移的目标函数为

$$sum=\sum_{i=1}^{62} (x_i^{cal}-x_i^{obsr})^2+\sum_{i=1}^{62} (y_i^{cal}-y_i^{obsr})^2 \rightarrow min \tag{2}$$

式中， x_i^{cal} 、 y_i^{cal} 为位移有限元计算值， x_i^{obsr} 、 y_i^{obsr} 为GPS站水平速度观测值。

我们通过逐步调整边界分段位移的大小和方向，使区域内部GPS水平速度场和有限元计算速度场之差的平方和最小。

本文所采用的优化方法为一阶方法。它使用梯度计算来确定搜索方向，优点是精度高，但比较费时。

3.3 反演结果及分析

我们利用上面提到的原理和方法对区域边界分段位移进行了反演，获得了10个分段边界的位移矢量。通过这10个分段边界位移的约束，就可以获得由分段边界位移控制的区域水平运动场，进而获得面膨胀率和最大剪应变率场。需要说明的是，在进行有限元模型建模时，由于断裂和实际情况的差异，GPS站点分布的不均匀性和边界划分的不够合理，会造成反演结果的多样性，这样我们得到的结果可能和实际情况会有一些出入，因此需要结合该区地质构造和强震震中分布，分析这几种场与该区强震活动的相关性，并进一步分析未来强震活动分布的可能的空间格局。图3是反演得到的边界位移所形成的区域内部拟合站点的速度矢量和实际观测到的速度矢量。通过该图可以看出，反演结果和实际观测结果比较一致。

图5是由反演所得边界分段位移再造的区域内部水平应变率场。从图上可以看出以下几个特点：①喜马拉雅带及附近地区主应变率量值高，特别是印度板块与欧亚板块边界附近是全区主应变率量值最高的区域。主压应变率方向大致为近SN—NNE向，与主干断裂接近垂直，且主张应变率量值比主压应变率量值小得多，这个区域基本上为

挤压形变区。由板块边界向里推进，主压应变率量值明显减小，相对而言主张应变率量值增大，到羌塘地块，二者量值基本相当，再往北则变化不大。②以90°E经线为界，以西的主压应变率方向基本上为SN—NNE向，以东的主压应变率方向为NNE—EW—EES，呈顺时针旋转。③青藏块体中部以北地区，主压应变方向与主干断裂方向的夹角在30°~60°之间，为左旋剪切变形区。从羌塘地块东部到川滇地块，主压应变率方向随着主干断裂方向逐渐偏转，并且与主干断裂的夹角在30°~60°之间，拉张变形明显，为走滑变形区。这和江在森等（2006）的研究结果基本一致。④印度板块的东、西两个“触角”出现较大量值的应变率，西部的帕米尔“触角”主要以NEE向压应变为主，东部的阿萨姆“触角”由于物质顺时针流出，出现较大的张应变。

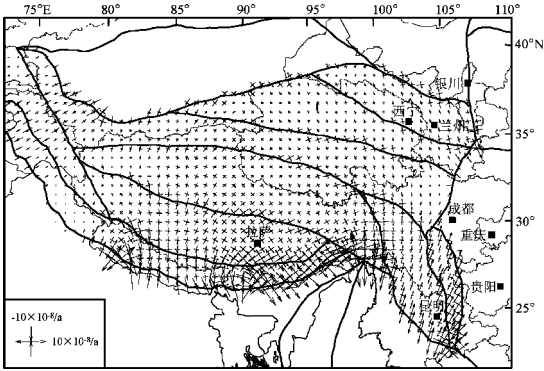


图5 反演所得主应变率场
Fig 5 Inversed principal strain rate field

图6和图7分别是面膨胀率分布图和最大剪应变率分布图。从图中可以看出：①整个青藏高原的区域面膨胀率以负值为主，说明青藏高原的内部变形以SN向的地壳缩短为主；②面膨胀率和最大剪应变率等值线分布基本上与断裂走向一致。

速度场和应变率场与强震对应关系：①研究区M_≥7.0地震大都发生在相对速度方向变化明显或速率量值衰减较快的部位，如滇、缅、藏一带受到印度板块前缘的阿萨姆角的NE向推挤和川滇地块被挤出的影响，水平运动的方向、大小变化剧烈，多年来一直是强震频发的部位。2001年11月14日昆仑山口西8.1级大震发生在昆仑地块和柴达木地块分界处的东昆仑断裂上，该断裂也

是一个明显的速度方向转折带。2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大震也发生在速度方向分化的位置, 这个位置也是速率量值衰减较快的位置。② 与区域主干断裂的构造活动背景相一致的最大剪应变率的高值区是强震比较容易发生的部位 (图 7)。③ 与区域主干断裂的构造活动背景相一致的面积膨胀率梯度变化剧烈部位也是强震危险区。

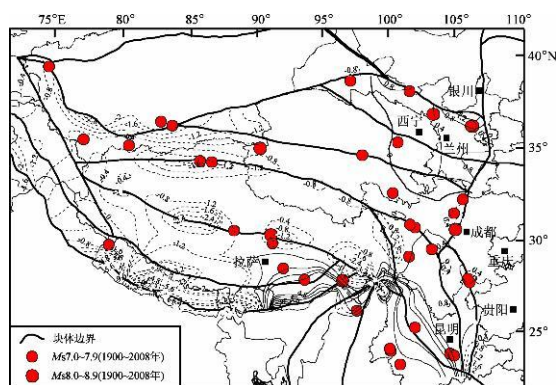


图 6 反演所得面膨胀率场
Fig 6 Inverse area strain rate field

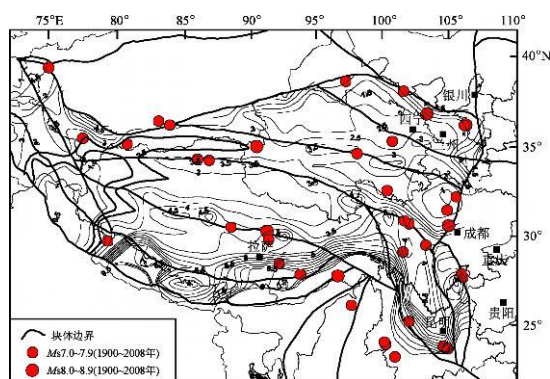


图 7 反演所得最大剪应变率场
Fig 7 Inverse maximal shear strain rate field

4 结论

(1) 青藏地块应变率大小和方向存在明显的分区性: 喜马拉雅带及附近地区主应变率量值高; 以 90°E 经线为界, 以西的主压应变率方向基本上为 $\text{SN} \sim \text{NNE}$ 向, 以东的主压应变率方向为 $\text{NNE} \sim \text{EW} \sim \text{EES}$ 呈顺时针旋转; 青藏块体中部以北地区, 主压应变方向与主干断裂方向的夹角在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间, 为左旋剪切变形区。从羌塘地块东部到

川滇地块, 主压应变率方向是随着主干断裂方向逐渐偏转的, 并且与主干断裂的夹角在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间, 拉张变形明显, 为走滑变形区; 印度板块的东、西两个“触角”出现较大量值的应变率, 西部的帕米尔“触角”主要以 NEE 向压应变为主, 东部的阿萨姆“触角”由于物质顺时针流出, 出现较大的张应变。

(2) 整个青藏高原的内部变形以南北向的地壳缩短为主。

(3) 研究区 $M \geq 7.0$ 地震大都发生在相对速度方向变化明显或速率量值衰减较快的部位。

(4) 与区域主干断裂的构造活动背景相一致的最大剪应变率的高值区是强震比较容易发生的部位。

(5) 与区域主干断裂的构造活动背景相一致的面积膨胀率梯度变化剧烈部位也是强震危险区。

在用 GPS 水平速度场成果研究地壳水平运动时, 由于测点分布不均匀且稀疏, 存在着许多困难。利用 GPS 高精度水平速度场成果, 借助二维有限元技术, 通过理想的假设, 构建区域二维有限元模型, 结合最优化原理来反演区域边界位移, 重建均匀的、统一的变形场, 来研究区域地壳运动变形与强震之间的关系是一条行之有效的途径。

参考文献:

- 独知行, 卢秀山. 2003. 基于力学模式的大地测量反演理论及应用 [M]. 北京: 地震出版社.
- 甘卫军, 沈正康, 张培震, 等. 2004. 青藏高原地壳水平差异运动的 GPS 观测研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 24 (1): 11—14.
- 江在森, 杨国华, 王敏, 等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (3): 1—9.
- 蒋锋云, 王双绪, 张希, 等. 2007. 用二维有限元研究青藏块体东北缘地壳的水平运动 [J]. 大地测量与地球动力学, 27 (4): 21—30.
- 赖锡安, 黄立人, 徐菊生, 等. 2004. 中国大陆现今地壳运动 [M]. 北京: 地震出版社.
- 李延兴, 杨国华, 牛之俊, 等. 2004. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型 [J]. 中国科学, 33 (增刊): 21—31.
- 王庆良, 王文萍, 崔笃信, 等. 2002. 青藏块体东北缘现今地壳运动 [J]. 大地测量与地球动力学, 22 (4): 12—16.
- 张培震, 邓超东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学, 333 (增刊): 12—20.
- 张晓亮, 江在森, 王双绪, 等. 2004. 青藏块体东北缘地壳运动与孕震特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 24 (4): 76—81.

Research on Horizontal Crust Movement in Qinghai-Tibet Block
with 2D Finite Element Method

JIANG Feng-yun ZHANG Xi ZHANG Xiao-liang WANG Shuang-xu GENG Xiao-ming
(Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Transforming the reference frame of the velocity field of horizontal movement observed by GPS from 1998 to 2003 in the Qinghai-Tibet Block and deducting the holistic movement from it, we get the velocity field reflecting relative movement in this region. On the basis of this velocity field and according to the optimization theory, we deduce the segmented displacements of the boundary of the studied area with two-dimensional finite element model of linear elasticity. Taking the results as boundary constraint, we rebuild the velocity field of horizontal movement, the strain rate field and surface dilation rate in the region. The relationship between the location of potential strong earthquake and the strain rate field and deformation field in the area of tectonic structure are analyzed.

Key words: Qinghai-Tibet Block, GPS, 2D Finite Element method, optimization theory, strong earthquake



邓柏昌 华南理工大学物理系副教授。1982年7月毕业于合肥工业大学地质系应用地球物理专业,获学士学位。1992年毕业于北京师范大学物理系物理教学专业,获硕士学位。主要从事电离层物理、地震电磁预报、电磁场理论及工科大学物理教学法等方面的研究工作。



武安绪 北京市地震局副局长。1989年毕业于云南大学地球物理系。目前主要从事地震活动、地壳形变、数字波形、综合预报、爆炸识别、信号处理、软件开发等研究工作。



蒋锋云 中国地震局第二监测中心工程师。2002年毕业于东华理工大学测绘系测绘工程专业,获理学学士学位。2006年毕业于中国地震局地震研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震预报与GPS数据处理及分析等方面的工作。



段虎荣 陕西铁路工程职业技术学院讲师。2002年7月毕业于长安大学测量工程专业,获学士学位;2006年7月毕业于长安大学大地测量与工程测量学专业,获硕士学位;2008年4月开始攻读长安大学大地测量与工程测量学博士学位。主要从事卫星大地测量研究工作。



武艳强 中国地震局地震预测研究所助理研究员。2003年天津大学计算机信息管理专业毕业,获学士学位;2008年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业,获理学硕士学位。主要从事大地测量数据处理与分析、孕震形变场识别等方面的研究工作。



张建国 河北省地震局邯郸地震中心台工程师。2006年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业,获理学学士学位。2008年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震监测工作。



李俊 四川大学电子信息学院在读硕士研究生。2006年毕业于四川大学电气信息学院,获工学学士学位。主要从事网络多播技术的研究工作。



庞卫东 2006年毕业于昆明理工大学地球科学系资源勘查工程专业,获学士学位,现为云南大学地球物理系在读硕士研究生。主要从事地球物理数据处理、地震地质及地震活动性分析方面的研究工作。



吕坚 江西省地震局预报中心工程师。2007年毕业于中国科学技术大学地球物理专业,获学士学位。主要从事地震活动性、地震危险性和数字地震学研究工作。



赵刚 中国地震局地壳应力研究所副研究员。2002年毕业于中国地震局地壳应力研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事前兆观测技术研究工作。

注:秦嘉政、付虹、张立、潘纪顺、王赞赞、杨国华、胡亚轩、周光全的简介已分别刊登在本刊 Vol28 No4, Vol30 No1; Vol29 No4, Vol31 No3, Vol32 No2, Vol31 No1, Vol30 No2, Vol29 No2