

利用 GPS 时间序列对块体运动进行空间信息分离^{*}

武艳强¹, 江在森¹, 杨国华²

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036 2 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 利用 GPS 时间序列对块体运动的信息进行了分离, 发现块体的刚性运动、应变贡献部分变形和非规则变形所占的比重有明显差异, 其中第一部分比重最大, 其余两部分比重相当。从与地震孕育关系的角度看, 后两部分与地震孕育的联系更紧密一些, 它们反映了地震孕育过程的能量积累和震前的快速形变。最后, 利用 BJSJ、BJSH、JIXN 和 KC014 个 GPS 连续站数据计算了不同部分的信息分离结果, 并分析了 2006 年河北文安 5.1 级地震前块体的变形特征。

关键词: 块体运动; GPS; 刚性运动; 应变贡献部分变形; 非规则变形; 地震孕育

中图分类号: P542⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)03-0306-06

0 引言

地震工作者在研究地壳形变问题时, 常利用 GPS 资料计算指定区域的位移场、速度场和应变场。李延兴等 (2001)、石耀霖和朱守彪 (2004, 2006)、黄立人和王敏 (2003) 都对应变场公式进行过深入研究。同时, 还有多位研究者利用 GPS 资料研究中国大陆应变场及块体运动, 并取得了丰硕的成果 (石耀霖和朱守彪, 2004, 2006; 黄立人和王敏, 2003; 顾国华等, 2001; 江在森等, 2003; 杨国华等, 2002, 2008; 张培震等, 2003; 王敏等, 2003)。但上述几个场的信息只能反映块体地壳运动的总体状况, 对地壳运动细节的刻画还需要深入研究, 比如 GPS 时间序列中到底有多大成分属于刚性运动, 多大成分属于应变贡献部分变形, 又有多大成分属于非规则变形?

张国安等 (2002) 对不同种类连续形变资料进行了分析, 认为 GPS 连续观测资料对于地壳形变研究具有重要意义。为了挖掘 GPS 时间序列中隐含的信息, 笔者从 GPS 块体运动模型出发, 对 GPS 时间序列进行定量的信息分离。笔者在对信息分离方法进行讨论的基础上, 给出 GPS 时间序列空间信息分离结果, 并初步讨论了各部分信息与地震孕育过程的关系。

1 块体运动模型的原理及信息分离计算公式

块体的运动可以分为整体运动和内部变形。而整体运动可分为平移和旋转, 内部变形可分为应变贡献部分变形和非规则变形:

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_{all} = \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_r + \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_n. \quad (1)$$

根据公式 (1) 并参照李延兴等 (2001)、赖锡安等 (2004) 关于刚性、弹塑性运动模型的论述可知, 块体的刚性运动可用欧拉矢量描述, 如公式 (2) 所示; 应变贡献部分变形可用应变张量来描述, 公式 (3) 所示, 而对于非规则变形没有合适的模型来描述, 但可以用矢量求差的方法得到, 如公式 (4) 所示。

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_r = \begin{bmatrix} -r \sin \varphi \cos \lambda & -r \sin \varphi \sin \lambda & r \cos \varphi \\ r \sin \lambda & -r \cos \lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_s = \begin{bmatrix} \epsilon_E & \epsilon_{EN} \\ \epsilon_{NE} & \epsilon_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\lambda - \lambda_0) r \cos \varphi \\ (\varphi - \varphi_0) r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_{all} - \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_r - \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix}_s. \quad (4)$$

* 收稿日期: 2008-05-26.

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目 (2006BAC01B03-01-01, 2006BAC01B02-02-02) 资助.

式 (2)、(3) 中, λ 、 φ 分别为观测点的经度和纬度, V_E 和 V_N 为 E 向位移和 N 向位移; ω_x 、 ω_y 和 ω_z 为块体的欧拉矢量; r 、 λ_0 、 φ_0 分别为块体的平均曲率半径、几何中心经度和几何中心纬度; ϵ_E 、 ϵ_{EN} 、 ϵ_{NE} 和 ϵ_N 为区域内的应变张量。

根据公式 (1) ~ (4), 可以得出利用 GPS 数据进行信息分离的过程: 首先利用公式 (1) ~ (3) 计算出 6 个待定参数 (3 个欧拉参数和 3 个应变参数), 然后根据公式 (2) 和公式 (3) 计算出每个点的刚性运动分量和应变贡献部分变形分量, 最后利用公式 (4) 计算出非规则变形分量 (包含噪声部分)。

在计算 6 个待定参数时原则上有 3 组 GPS 数据就可以求解, 但 3 组数据只可以组成 6 个观测方程 (不考虑 U 分量影响), 没有多余观测, 由此带来的问题是非规则变形无法识别并且不能评定参数 (应变参数和欧拉参数) 精度。因此, 要进行 GPS 数据信息分离, 至少应使用 4 个点的观测数据。

另外, 公式 (1) ~ (4) 是理论公式, 在实际应用中由于观测数据误差的影响, 每一部分都包含一定的误差, 特别是非规则变形部分是由求差的方式得出的, 所以其误差可能更大一些。

2 GPS 时间序列信息分离实例

通过分析全国 GPS 连续站的位置以及各连续站的分布特征, 笔者选取首都圈区域 4 个连续站 (BJFS BJSH JKN 和 KQ01) 进行信息分离分析。该区域的数据积累时间为 3 年多 (KQ01 较短), 其间 2006 年 7 月 4 日河北文安发生 5.1 级地震。笔者通过信息分离结果分析文安地震的孕震过程。

由于 BJFS 和 KQ01 距离震源区较近, 而 BJSH 和 JKN 距离震源区较远, 所以它们所处地点应该有不同的变形特征。

图 1 ~ 图 4 展示了首都圈地区的 GPS 连续站信息分离结果, 图中的灰色曲线为各分量结果, 黑

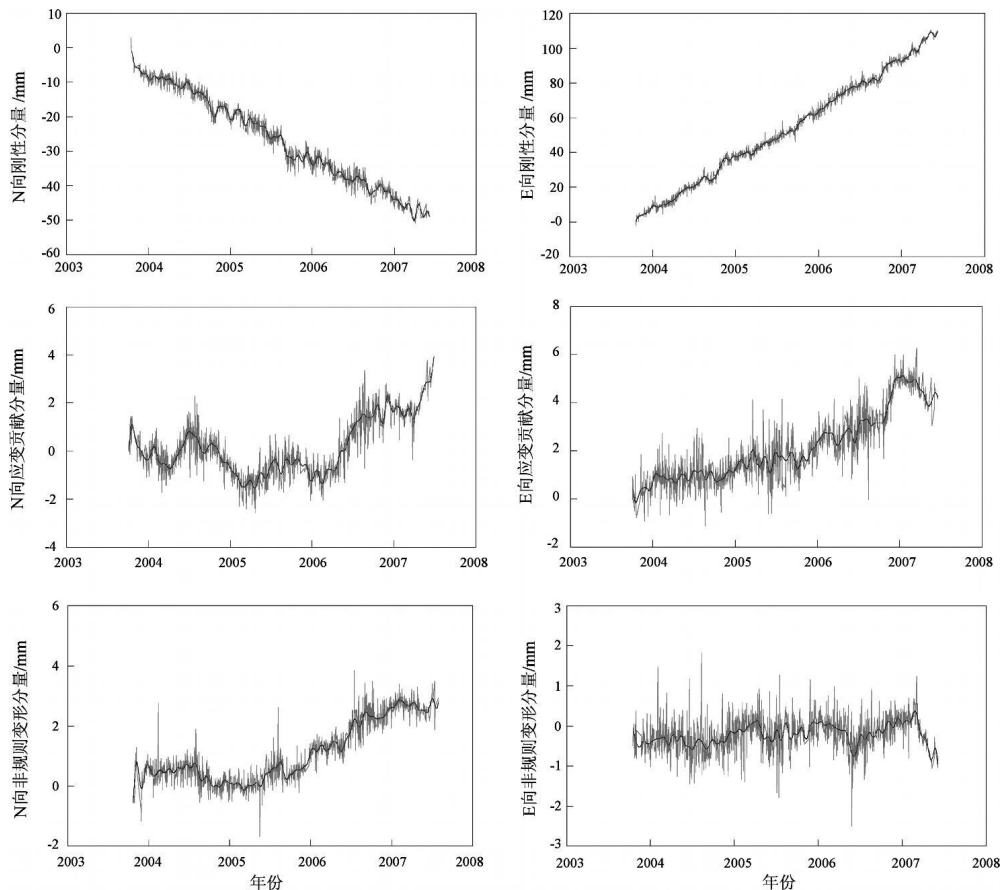


图 1 BJFS 站信息分离结果

Fig 1. Information division of BJFS Station

色曲线为各分量最小二乘配置滤波结果。从图中可以看出地壳的刚性运动占的比重最大，应变贡献变形和非规则变形比重相当。从总体上看，4个站刚性分量的运动趋势完全一致，该分量表现了块体的整体运动状态，对于文安地震孕震过程的反映不显著。另外，从理论上讲刚性运动应该是稳定的，不应出现较大的数据波动，而图 1 的刚性运动都有一定的离散度，究其原因是在参数计算中存在观测误差（如白噪声、随机噪声等），致使计算结果不可避免地受到观测值的影响。同时，根据刚性运动部分的计算公式，可知该部分信息还包含大部分公有误差分量，比如框架框动的影

响，因此这类误差具有一定的系统性，可以通过建模来削弱。

BJFS站和 KC01站距离文安地震的震中较近，两站应该更能反映其孕震过程。通过观察图 1和图 4可以发现，位于主破裂西面的 BJFS站的应变贡献分量和非规则分量表现为北东向，并且以北向为主，而位于主破裂东面的 KC01表现为南西向运动，并且以南向为主。由于文安地震的主破裂为近南北向右旋破裂（江在森等，2006），这两个站的地壳变形方式与震源主破裂方式一致，表现为南北向变形较强，东西向变形较弱，非线性变形很小。

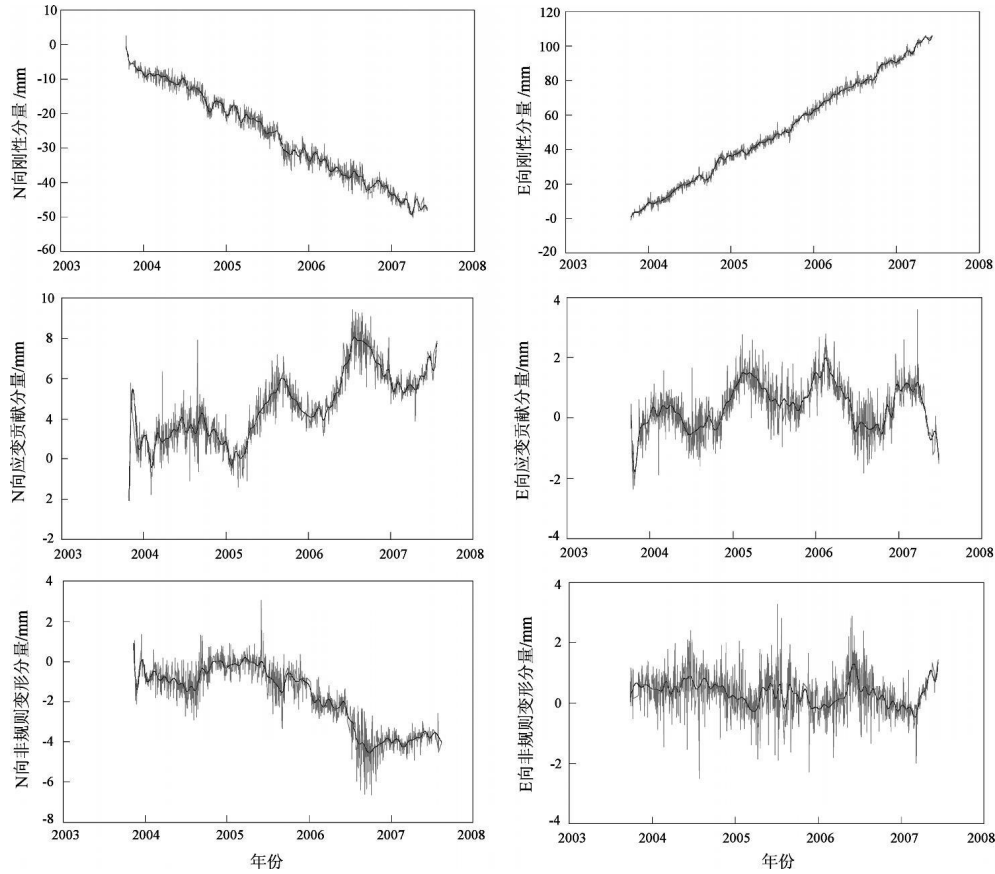


图 2 BJSH站信息分离结果
Fig 2 Information division result of BJSH station

BJSH和 JXN站距离震源较远，对于孕震过程的反映应该弱一些。通过观察图 2和图 3可以发现，两站的应变贡献分量表现了震源机制特征，而非规则变形部分则出现了反方向变化。其原因可能在于计算应变时假定区域具有均匀变形特性，而 BJFS和 KC01站因距离震源较近而变形幅度较

大，BJSH和 JXN站由于距离震源较远而变形幅度较小，所以在计算时由于比重最大的 BJFS和 KC01站的拉动，使 BJSH和 JXN站测得的非规则变形部分出现反方向变化。另外，从首都圈区域的信息分离结果来看，4个站的北向应变贡献分量和非规则变形分量都有一定的异常反应。

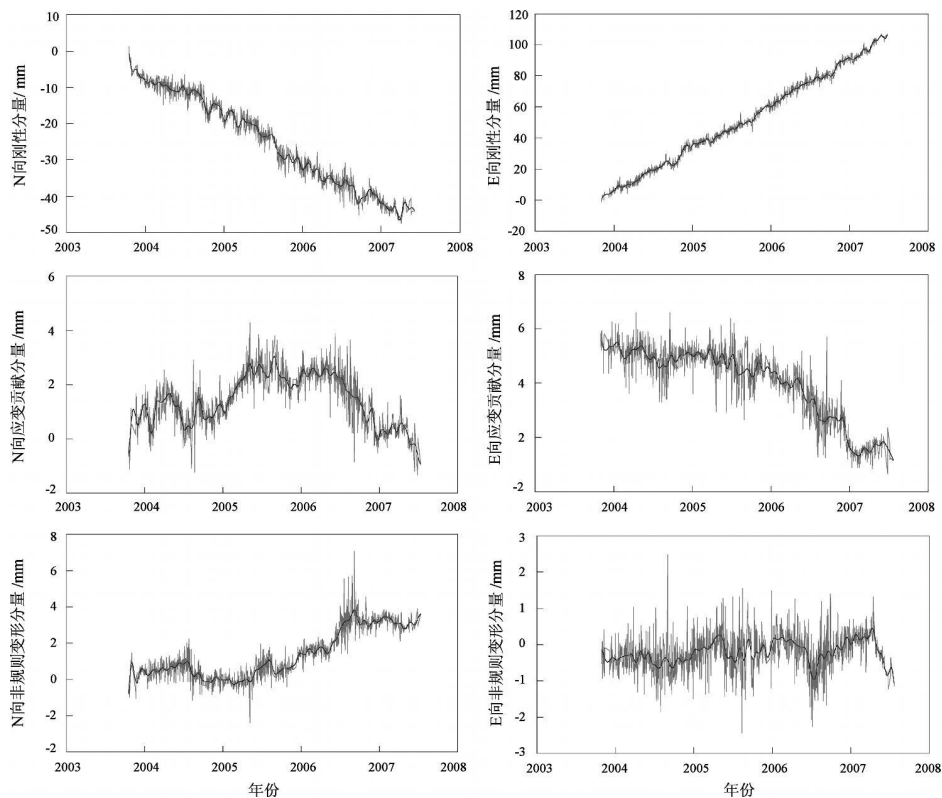


图 3 JKN 站信息分离结果
Fig 3 Information division result of JKN station

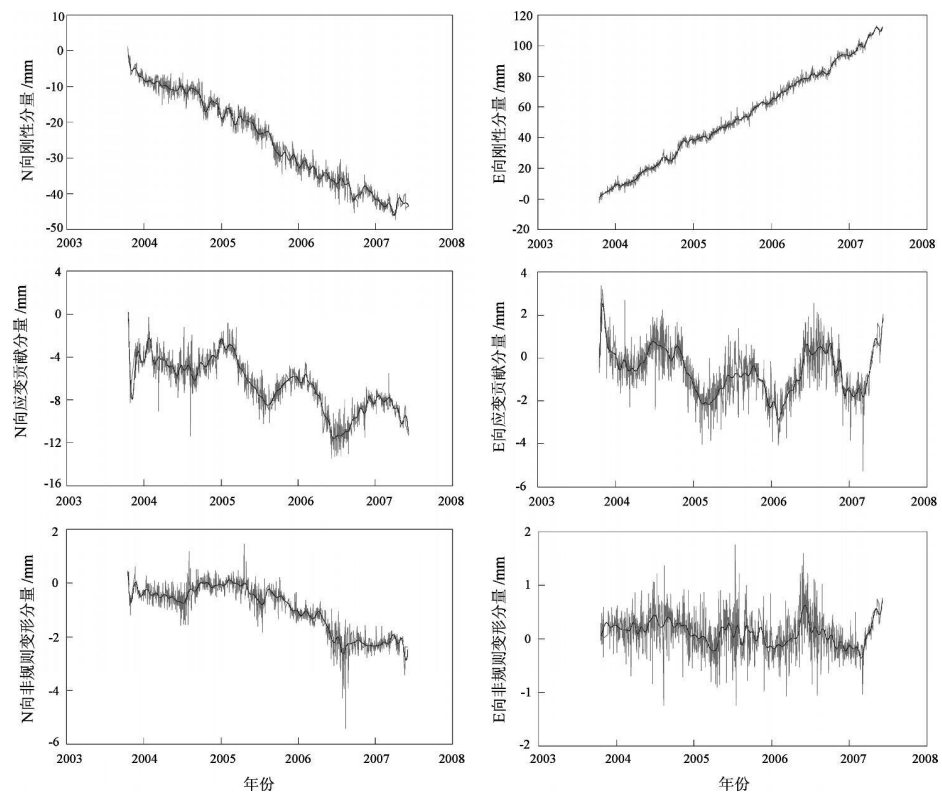


图 4 KQ1 站信息分离结果
Fig 4 Information division result of KQ1 station

3 结论

通过对 GPS 连续站信息分离结果的分析, 不难发现该分离方法在分析时间序列构成方面是有效的, 同时该方法的应用还有利于对地震异常做出判断。

(1) 信息分离的优势: ① 在信息分离过程中, 可以把原来的一组数据分离成 3 组, 从而加大了信息量。② 不同分量反映不同物理意义: 刚性分量表征了块体的整体运动, 与块体内部地震相关性不大, 但与块体的边界带地震可能有一定关系; 应变贡献分量描述了区域内应变积累的过程, 反映了块体内地震的能量积累过程; 非规则变形分量描述了块体的非均匀变形。③ 由于非规则变形部分无法建立模型来描述, 只能通过矢量求差得到, 所以在对该分量进行分析时需要注意其误差较大的特性。

(2) 信息分离的特点和需要注意的问题。通过前面的讨论, 可以发现距离震源越近的点的信息分离结果越能反映地震的孕震特征。如果某站点的应变贡献分量和非规则变形分量的趋势一致, 则表明该站附近存在着一定的异常信息, 如果二者趋势相反则说明异常离该站较远。因此, 可以根据不同点的信息分离结果对研究区域的异常地点进行定位。另外, 在进行信息分离时需要注意块体边界。如果块体边界十分清楚, 就可以同时利用块体内的多个点进行信息分离, 否则应采用 4 个点进行信息分离。

(3) 对应变计算的建议。根据应变计算公式可知 3 个不在一条直线上的点就可以计算一组应变参数。但通过前面的讨论可知用 3 个点计算应变没有多余观测, 首先, 不能对应变参数和欧拉参数进行精度评定, 其次, 非规则变形信息因被压入

刚性运动和应变贡献变形中而无法识别。所以, 建议在应变计算中应至少采用 4 个点。

中国地壳运动观测网络的有关工作人员提供了 GPS 时间序列数据, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 顾国华, 申旭辉, 王敏, 等. 2001. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征 [J]. 地震学报, 23 (4): 263—369.
- 黄立人, 王敏. 2003. 中国大陆构造块体的现今活动和变形 [J]. 地震地质, 25 (1): 23—32.
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形 [J]. 地球物理学报, 46 (3): 352—358.
- 江在森, 王敏, 武艳强, 等. 2006. 大区域地壳运动动态变化及中国大陆地震趋势分析 [M] // 中国地震局地震预测研究所. 中国大陆强震趋势预测研究. 北京: 地震出版社, 153—168.
- 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, 黄城, 胡新康, 等. 2001. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态 [J]. 地震学报, 23 (6): 565—572.
- 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.
- 石耀霖, 朱守彪. 2006. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (1): 1—8.
- 王敏, 沈振康, 牛之俊, 等. 2003. 现今中国大陆的地壳运动与活动块型 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (增刊): 21—32.
- 杨国华, 李延兴, 韩月萍, 等. 2002. 由 GPS 观测结果推导中国大陆现今水平应变场 [J]. 地震学报, 24 (4): 337—347.
- 杨国华, 张晓东, 张风霜, 等. 2008. 昆仑山口西 8.1 级地震震后中国西部地壳水平位移场的变化特征 [J]. 地震研究, 31 (1): 77—82.
- 於宗伟, 鲁林成. 1978. 测量平差基础 [M]. 北京: 测绘出版社.
- 张国安, 陈德福, 陈耿琦, 等. 2002. 中国地壳形变连续观测的发展与展望 [J]. 地震研究, 25 (4): 383—390.
- 张培震, 邓启东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (增刊): 12—20.

Research of Spatial Separating Method by GPS Time Series

WU Yan-qiang¹, JIANG Zai-ser², YANG Guo-hua²

(1. Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China)

(2. First Crustal Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract

We divide the spatial information of the movement of the blocks into rigid movement, strain contribution, deformation and irregular deformation. The rigid movement takes the largest portion. The strain deformation and the irregular deformation are equally small portions. And they are relative to the genesis of the earthquake because they reflect the energy accumulation and fast deformation of the crust before the occurrence of the earthquake. Finally, we use the data from BJFS, BJSH, JKN and KC01 station to calculate different part information, and then discuss the deformation characteristics before M_s 1 Wen'an Hebei earthquake in 2006.

Key words: block movement, GPS, rigid movement, strain contribution, deformation, irregular deformation, earthquake genesis



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