

晋冀蒙交界区水平向构造活动的基本特征及动态变化*

杨博, 占伟, 刘志广

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 利用 1999~2007 和 2009~2012 年 GNSS 资料, 在形变场连续变化的条件下, 借助多核函数解析与水平运动滤波及利用坐标系转换公式获得平行和垂直于断裂带的运动结果, 给出了晋冀蒙交界区现今水平构造活动的方式与大小: (1) 1999~2007 年的垂直于断裂带的水平构造活动呈明显的张性活动状态, 在约 400 km 范围内年均张性活动量 3 mm 左右, 且基本上是以渐变的活动方式而均匀地过渡; 但沿断裂走向上却看不到显著的走滑活动, 在 400 km 的范围上仅观察到年均约 1 mm 的相对挤压量; (2) 2009~2012 年平行于断裂构造的活动仍为压性活动, 垂直于断裂构造的活动则为张、压相间的空间变化活动。这种动态变化可能受控于环境应力场的动态调整。

关键词: 晋冀蒙地区; 构造活动; 背景性形变; 动态变化

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)04-0472-06

0 引言

晋冀蒙交界区位于首都圈地区的西部, 山西断裂带的北部, 1989 年 10 月 18 日在大同一阳高发生了 $M_s 5.8$ 地震, 之后 1998 年 1 月 10 日在距大同一阳高地震 110 km 的张北发生了 $M_s 6.2$ 地震。从形变角度来看, 大同一阳高 $M_s 5.8$ 地震的孕震过程有“场”有“源”, 非常典型; 而张北 $M_s 6.2$ 地震的“场”、“源”似乎“不显著”(杨国华等, 1994, 2001, 2009)。由于当时缺乏 GNSS 复测资料及针对性水平向构造活动研究, 使我们难以了解其地震孕育的现今构造活动背景。近几年的震情分析表明, 晋冀蒙交界区当前仍是我们关注的重点地区。为了监视晋冀蒙交界区的地壳水平形变, 中国地壳运动监测网络在该区布设了 70 余个测站, 并开展了相应的研究工作(杨国华等, 2009), 但没有针对断裂构造活动的研究。因此, 弄清该区主要断裂带构造活动方式及其大小很有必要。本文利用 1999~2007 年和 2009~2012 年资料, 并借助多核函数解析与滤波及其断裂带走滑与张压活动的算法等, 揭示晋冀蒙交界区断裂带

现今背景性构造活动的方式与大小(1999~2007 年华北及周边地区相对平静)及其动态变化。

1 数据处理方法简介

1.1 多核函数与运动场的解析

关于核函数可有多种选择, 这里取用的形式为(杨博等, 2010a)

$$\begin{cases} f(\lambda, \varphi) = \sum c_j s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = \mathbf{S}^T \mathbf{C}^T \\ s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = d_j^{1.1} + 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, d_j 为球面上两点间的大地线长度(单位: km), $\mathbf{S}^T = (s_1, s_2, \dots, s_{n_x})$, $\mathbf{C}^T = (c_1, c_2, \dots, c_{n_x})$ 。

在 GNSS 计算中通常是以 ITRF 作为参考框架获取速度场, 而在实际分析时为了突出相对变化, 往往从水平运动中剔出欧拉运动矢量, 即相对于区域整体无旋转基准(杨国华等, 2005)。现假定测站 j 的位置坐标为 (λ_j, φ_j) , 其相应的东向和北向的相对运动为 $v_e(\lambda_j, \varphi_j)$ 、 $v_n(\lambda_j, \varphi_j)$; 因此, 只需对该水平运动进行解析。在用多核函数进行数值解析时, 应将所有测站位置作为核函数的核点

* 收稿日期: 2013-01-10.

基金项目: 科技支撑项目(2012BAK19B01-02)、地震行业科研专项(201308009)和中国地震局“强化华北地区强震监视跟踪”专项联合资助。

位置,因此任一方向均可列出 n 个方程(测站个数),故可求解 n 个未知数(C)。这时可获得二维相对运动解析式 $f_e(\lambda, \varphi)$ 和 $f_n(\lambda, \varphi)$,可计算研究区任意位置的二维运动结果(杨博等, 2010a),即

$$f(\lambda, \varphi) = f_e(\lambda, \varphi) \vec{i} + f_n(\lambda, \varphi) \vec{j}, \quad (2)$$

同理,也可获得与之相应误差的解析式

$$m(\lambda, \varphi) = m_e(\lambda, \varphi) \vec{i} + m_n(\lambda, \varphi) \vec{j}. \quad (3)$$

1.2 水平运动的滤波计算

由于式(2)得到的是二维运动观测值的解析结果,它不仅包含运动信息,同时也包含误差干扰。因此,有必要进行滤波与信息分离(杨博等, 2011)。为了保持运动场描述的协调性和彼此之间的相关性不被破坏,进行东、北向两个分量的滤波计算时,应采用相同的滤波计算准则。因此,东和北向运动分量的滤波函数可分别表示为

$$\begin{cases} F_e(\lambda, \varphi) = \sum a_i s_i(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = \mathbf{S}^T \mathbf{A} \\ F_n(\lambda, \varphi) = \sum b_i s_i(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = \mathbf{S}^T \mathbf{B}^T \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{A}^T = (a_1, \dots, a_{n_x})$ 、 $\mathbf{B}^T = (b_1, \dots, b_{n_x})$ 均为待定系数, $\mathbf{S}^T = (s_1, \dots, s_{n_x})$ 为核函数矩阵。进行滤波计算时,取高斯型函数作为核函数较恰当,高斯函数表示为

$$s_i(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = \exp(- (d_j/780)^{2.8}). \quad (5)$$

式中, (λ_j, φ_j) 为核点位置坐标。

在实际计算时,首先以等步长进行网格化计算(本文步长为 100 km),以获取两个分量运动与误差数据。然后以此作为“观测值”,依最小二乘法求解式(6)中的待定系数。当系数求得后,经滤波的运动场函数解析式为

$$F(\lambda, \varphi) = F_e(\lambda, \varphi) \vec{i} + F_n(\lambda, \varphi) \vec{j}. \quad (6)$$

据此可获得任意位置二维运动的滤波值。

根据误差传播规律,可进行任意分量滤波值的误差估计:

$$m_u^2(\lambda, \varphi) = m_l^2 \mathbf{S}^T \mathbf{Q}_u \mathbf{S}. \quad (7)$$

式中, $l = e, n$, m_l^2 为单位权方差, \mathbf{Q}_u 为相应的协方差阵。

1.3 断裂构造带运动的转换计算

通过式(1)~(7),我们可获得研究区测站

位置或任一点的相对运动,是进一步分析的基础。由于本文的研究对象是断裂带(断层)的活动习性及其在空间上的演化,而断裂带的走向并非一定是东西向或南北向,故需要进行投影或转换计算,以获得断裂带及其两侧的走滑活动和张压活动及其在空间上的变化(杨博等, 2010c)。具体做法如下:首先,结合图1及坐标旋转公式获得平行及垂直于断裂带的运动分量分别为:

$$\begin{cases} v''_{ee} = v'_{ee} \cos \alpha - v'_{nn} \sin \alpha \\ v''_{nn} = v'_{ee} \sin \alpha - v'_{nn} \cos \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中, v''_{ee} 和 v''_{nn} 分别为平行与垂直于断裂带的运动分量, v'_{ee} 和 v'_{nn} 分别为经过(1)~(8)式处理后的东向运动和北向运动分量, α 为旋转角,顺时针为正。在获得 v''_{ee} 和 v''_{nn} 的同时,若需对其进行精度评定,根据式(8)及误差传播定律,有:

$$m''_{ee} = \pm \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot m_e^2 + \sin^2 \alpha \cdot m_n^2 - 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot m_{en}}. \quad (9)$$

$$m''_{nn} = \pm \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot m_e^2 + \cos^2 \alpha \cdot m_n^2 - 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot m_{en}}. \quad (10)$$

式中, m_e 、 m_n (及 ρ) 可从 GNSS 前期数据处理中所给出的运动结果中获取,协方差 m_{en} 虽未直接给出,但可由下式计算得到

$$m_{en} = m_e \cdot m_n \cdot \rho. \quad (11)$$

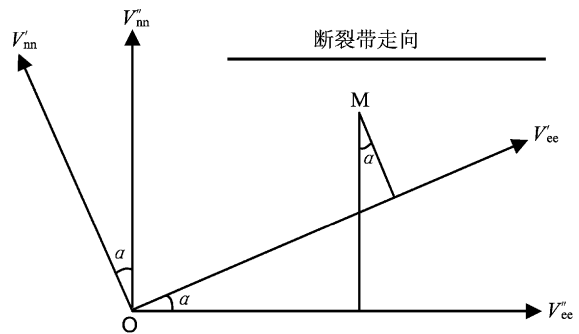


图1 坐标系及坐标变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coordinates system and its transformation

2 晋冀蒙地区的北东向构造变形及其动态变化

晋冀蒙交界地区位于山西断陷带北部、鄂尔多斯断块东侧,北为阴山燕山隆起带,东为华北平原拗陷区。区内地质构造条件较为复杂,由十余个走

向东北至北东东呈右行斜列的地堑和山脉组成,表明该区断裂构造活动背景应为张性活动。杨国华等(2009)研究显示,该区虽然位于张渤带西部,但其构造活动与张渤带(中、东段)有所不同(杨国华,黄立人,2009),因此成为人们关注的地区之一。为了更加有效地观察与了解断裂构造活动,依据(1)~(11)式,在获得较佳结果后,又将运动结果分解为与断层平行和垂直的两个分量,以期揭示区内断裂系(带)的活动习性与大小及其在空间上的变化。

图2所示为1999~2007年的晋冀蒙交界水平运动结果。由图可见,该结果整体上是有序的,基本特征为垂直于断裂带的运动为相对拉张,平行于断裂带的运动为相对挤压。这说明现今垂直于断裂带的运动仍为张性运动,继承性的活动方式没有发生变化。从空间的大小变化来看,西北部张性活动相对强一些,东南相对弱一些(东南角除外,因为它已经属于华北平原拗陷区)。然而,根据平行于断裂带的运动可知,断层似乎不存在可辨的走滑运动,呈现的却为相对挤压。这与地质上张性兼右旋走滑的活动不一致,这可能说明现今的活动与地质历史上的活动有所区别,或者说地质历史上的构造活动并不一定在某种方式下持续不变,会有波动存在其中。从机制上看,造成现今的活动形态应该是水平力与垂直力共同作用的结果。以现有的结果我们推测地幔上涌是

导致断裂带张性活动的主要动力源之一,鄂尔多斯块体向东北推挤及燕山地块的阻挡可使其产生平行于断裂带的挤压变形,而这种挤压又在一定程度上加大了物质在垂直方向上的引张运移,故而形成了现今这样一种构造活动形态。因此,推测现今控制该地区构造活动的主要力源为地幔上涌的垂直力(重力均衡的滑脱效应)和鄂尔多斯块体与燕山地块的相对挤压力。

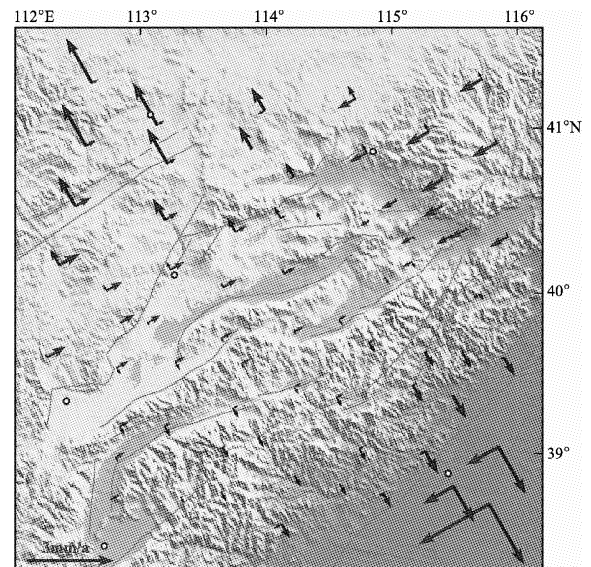


图2 1999~2007年晋冀蒙交界的构造运动
Fig. 2 Tectonic motion in juncture area of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia from 1999 and 2007

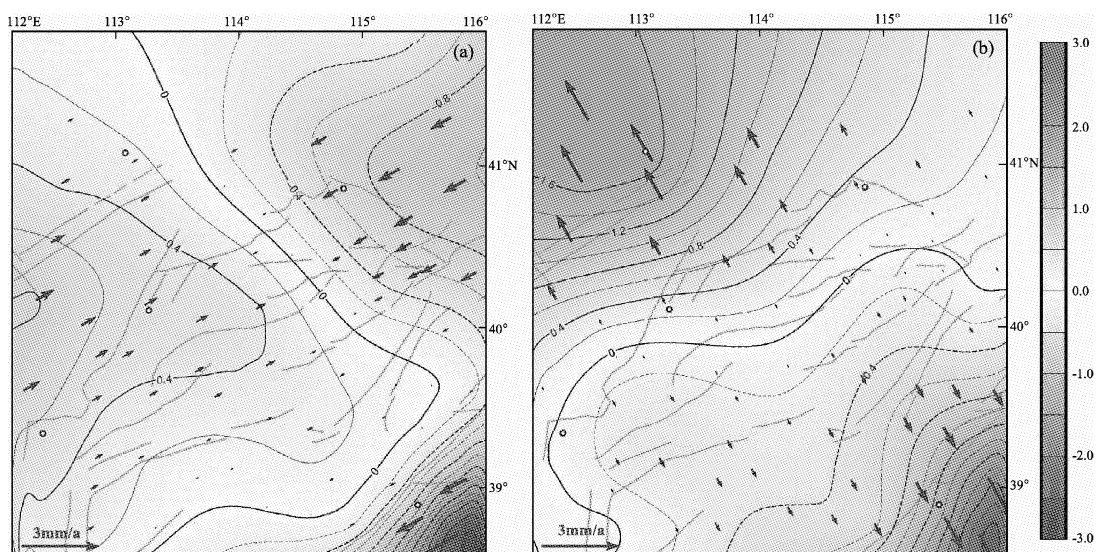


图3 1999~2007年晋冀蒙交界平行(a)、垂直(b)于断层带的构造运动
Fig. 3 Tectonic motion parallel (a) and perpendicular (b) to the fault-belt in juncture area of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area from 1999 and 2007

图3a为1999~2007年晋冀蒙交界平行于断裂带运动大小的空间分布。由图可知,除研究区东南角个别点外,在400余公里的范围上该地区的最大挤压量为 1.1 mm/a 。东南角的3个点(个别点)虽然较大,但其空间位置已属华北平原,并非属于本构造体系。从等值线分布密度来看,研究区东西部主要表现为相对挤压运动,且东北部地区的挤压变形稍强于西南部地区;但总的来说,趋势性的变化是占主导地位的,而差异性变化是次要的,体现了空间变化的较均匀性。从等值线的走向来看,研究区的中、北部地区基本上与断层走向垂直,显示了断层两侧不存在走滑运动,而研究区南部的等值线则平行于断层走向,兼顾大小的分布,显示了右旋活动的迹象,但由于数值较小,从误差角度看不够显著,因此可以认为断层两侧的活动目前还达不到可辨认的程度。但就一定宽度的断裂带而言,存在右旋形变的迹象。

图3b为1999~2007年晋冀蒙交界垂直于断裂带运动大小的空间分布。由图可以看出,即使不考虑东南角3个点的运动,在400余公里的范围上其最大张性量为 1.6 mm/a ,明显超过了图3a中的最大压性量,说明了张性形变大于压性形变。就等值线的分布密度而言为“北密南疏”,这说明北部的张性形变大于南部的张性形变。区内尽管存在差异变化,但整体上的变化仍是趋势性的。等值线的优势走向基本上平行于断层的优势走向,这说明张性形变是沿着垂直于断裂带的方向展开。这是该时段垂直于断裂带方向上地壳运动分量大小与空间变化的基本特征。

图4为2009~2012年晋冀蒙交界区的构造运动结果。在该时段内或之前较近的时间内发生了汶川8.0级和东日本海9.0级两次大地震,这可能表明该区域环境应力场会出现某种程度的扰动。由图可以看出,该时段结果的整体性1999~2007年的结果已不完全相同,从性质上看主要体现在垂直于断层的运动分量,整体的趋势性被打破,表现为空间上的张压并存。虽然如此,但张压是有序而非杂乱的,即太行山脉为压性,其余地区为张性。与1999~2007年相比,存在着一定程度的动态变化。

图5a为2009~2012年晋冀蒙交界区平行于断裂带运动大小在空间上的分布。由图可以看出,研究区东侧与北侧运动大小的差异变化较小,表现

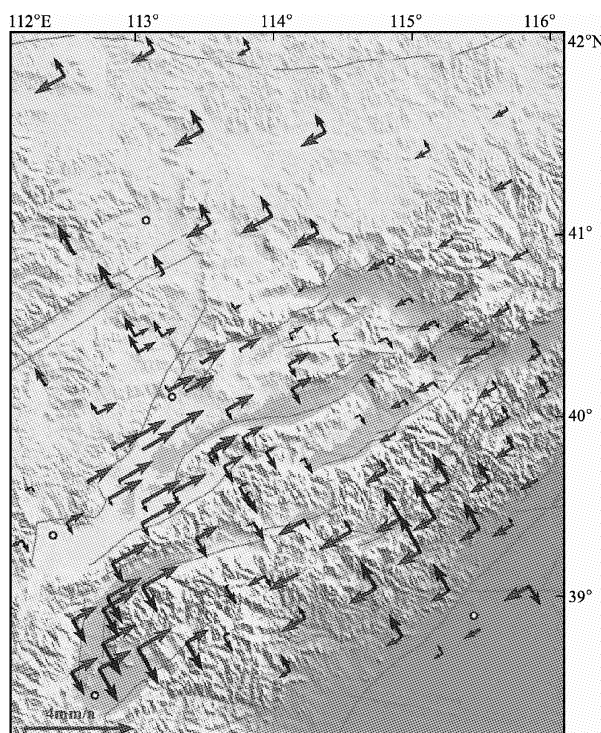


图4 2009~2012年晋冀蒙交界区的构造运动
Fig. 4 Tectonic motion in juncture area of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area from 2009 and 2012

为等值线分布宽缓,平均运动量级约为 0.8 mm/a ;然而,西南区域运动大小的整体性欠佳,由东向西存在着由小到大,再到小的空间变化过程,最大达 1.6 mm/a 。在研究区的空间范围内相对压缩量最大已超过了 2 mm/a ,较1999~2007年有所加大。另一个不同点是西南区域等值线空间分布密度有了明显的提高,这表明了该区域的形变率有一定程度的加强;中南区带的右旋形变也显得较前明显。

2009~2012年垂直于断裂带的运动在大小和性质上的变化最为突出,呈现了张、压相间的变化格局(图5b),具体为西北区域为拉张性的构造活动,与1999~2007年的活动性质相一致,最大量值为 1.8 mm/a ,也与前基本一致;而西南区主要表现为挤压性构造活动,与前有明显的不同,挤压量最大也达到了 1.8 mm/a ,主要彰显了太行山脉与断陷盆地的相对挤压,形变梯度也有一定的增大。然而,等值线的走向却与前保持一致性,大体与断裂走向平行,这说明该时段的变化虽然比较突出,但还未彻底超越常态变化的范畴(如闭锁或完全背离常态形变),似乎还不是强震临近的前兆异常,有必要进一步跟踪。

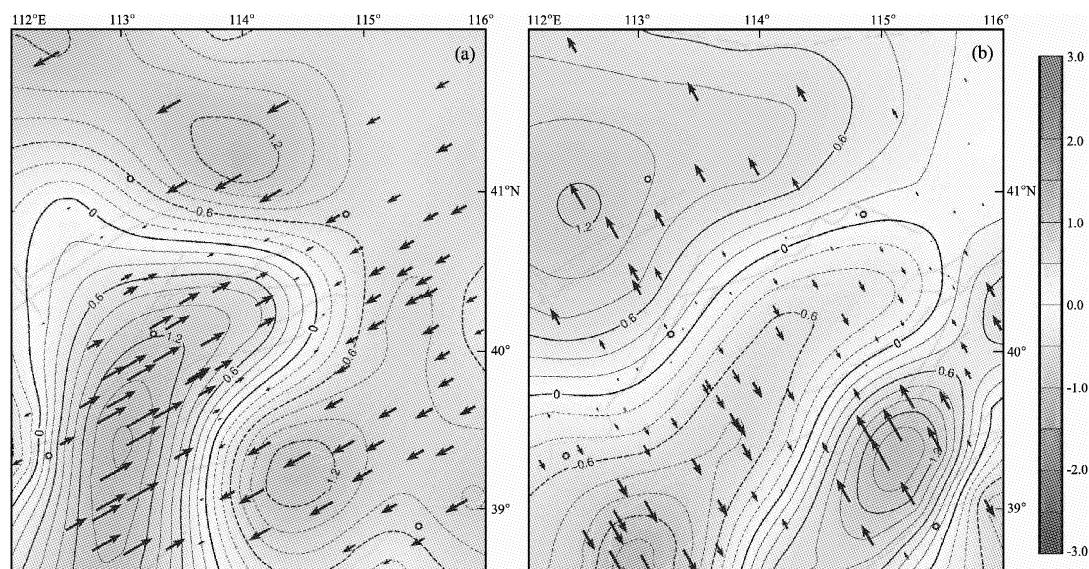


图5 2009~2012年晋冀蒙交界平行(a)、垂直(b)于断层的构造运动

Fig. 5 Tectonic motion parallel (a) and perpendicular (b) to the fault-belt in juncture area of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area from 2009 and 2012

3 讨论与结论

针对断裂带的构造活动,从场的角度来展现其活动性质与大小是较为可行与有效的,它可使我们更加直观地了解和确定断层张、压和走滑活动的性态等。通过对晋冀蒙交界区的研究资料处理,使我们清楚地了解到该区具有常态性质构造活动方式、大小及其在空间上的分布:1999~2007年北东向断裂带呈张性活动状态,在约400 km宽度上年均张性活动量3 mm左右,并以渐变的活动方式而较均匀地空间过渡,而沿断裂走向上却看不到明显的走滑活动;2009~2012年平行于断裂构造的活动仍为压性活动,数值上略有增加,垂直于断裂构造的活动则为张、压相间的空间变化活动,有一定程度的偏离,但综合观察认为并不一定是强震临近的前兆,可能是周边环境应力场的扰动所致,有必要进一步跟踪监测。

参考文献:

- 杨博,张风霜,韩月萍. 2011. 球面水平应变场无偏差计算与滤波[J]. 地震研究,34(1):59-66.
- 杨博,张风霜,韩月萍. 2010a. 多核函数法及其在GPS时序资料滤波中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,30(4):137-141.
- 杨博,张风霜,占伟,等. 2010b. 水平运动场滤波的尝试及其应变计算[J]. 大地测量与地球动力学,30(5):106-112.
- 杨博,周伟,陈卓越,等. 2010c. 断裂区带变形分析方法及应用[J]. 西北地震学报,32(3):215-219.
- 杨国华,巩日沐,杨春花. 1994. 大同地震与华北北部地壳异态垂直运动[J]. 中国地震,10(1):13-18.
- 杨国华,韩月萍,杨博,等. 2009. 华北地区最近几年水平形变场的含义与讨论[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),28(6):1-8.
- 杨国华,黄立人. 1990. 速度面拟合法中多面函数几个特性的初步数值研究[J]. 地壳形变与地震,10(4):70-82.
- 杨国华,江在森,武艳强,等. 2005. 中国大陆整体无净旋转基准及其应用[J]. 大地测量与地球动力学,29(4):6-10.
- 杨国华,王敏,韩月萍. 2001. 华北中北部地壳运动与张北地震[J]. 中国地震,17(3):301-311.

Basic Characteristic and Dynamic Change of Horizontal Tectonic Motion in Shanxi-Hebei-Inner Mongolia Area

YANG Bo, ZHAN Wei, LIU Zhi-guang

(*The First Monitoring and Application Center, Tianjin 300180, China*)

Abstract

Based on the GNSS observation data from 1999 to 2007 and from 2009 to 2012, we analyzed the mode and intensity of the present horizontal tectonic motion in Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area, by using the method of multi-kernel function analysis, horizontal movement filtering, and the arithmetic about the tectonic motion result parallel or perpendicular to the fault-belt obtained by coordinate transform formula. The results show as follows: (1) From 1999 to 2007, the horizontal tectonic activity perpendicular to the fault-belt showed tensional activity and basically uniformly transited in gradual active manner, and the maximal value was 3 mm/a in the range of about 400 km. However, there were no apparent strike-slip activity along the fault-belt, and the relative compression amount was about 1 mm/a in the range of 400 km. (2) From 2009 to 2012, the tectonic activity parallel to the fault-belt still showed compressive activity, and the tectonic activity perpendicular to the fault-belt showed the space activity of tensional and compressive alternately. This dynamic variation may be dominated by dynamic adjustment of environment stress field.

Key words: Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area; tectonic activity; dynamic variation