

断裂区带变形分析方法及应用

杨 博, 周 伟, 陈阜超, 韩月萍
(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要:应用 GPS 观测技术专门研究活动断裂区带的地壳形变及其服务于地震预测的数据处理方法目前还不够完善与充分。本文针对这一问题并结合实际的需求,从场的角度提出了适合于断裂区带活动特征分析的数据处理方法,并以川滇菱形块体东边界带为例,依据 1999 - 2004 年的 GPS 资料对其进行了简要分析。结果表明:①经过这种处理与描述可使人们从多角度更清楚全面地了解断裂及两侧的相对活动,及在空间上的演化特征;②走滑运动等值线显示川滇菱形块体东边界两侧相对活动量最大达 15 mm/a,分布宽度约 400 km,然而活动量的 2/3 只分布在断层两侧近 100 km 的范围内,清晰而定量地显现了高剪切应变的积累与存在的空间;③走滑运动梯度显示川滇菱形块体东边界带南段变形大于北段;④张压性运动结果显示断裂两侧没有明显的差异变化。

关键词: GPS; 数据处理方法; 梯度变化; 活动断裂区带; 川滇块体东边界带

中图分类号: P227 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2010)03-0215-05

Analysis Method of the Crustal Deformation on Fault Zone and Its Application

YANG Bo, ZHOU Wei, CHEN Fu-chao, HAN Yue-ping
(First Crustal Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract: The research on crustal deformation especially in active fault zone using GPS technique and the related data processing method for earthquake prediction are now not perfect and enough. Aimed at this problem and for actual work requirement, the data processing method for the characteristic analysis of crustal deformation in fault zone is suggested from field view in the paper. Based on the GPS data from Sichuan - Yunnan region in 1999 - 2004, the crustal movement characters in eastern boundary fault zone of Sichuan - Yunnan block are analyzed by using this method. The results show as follows: (1) The relative movement and spatial variation in both sides of the fault zone can be shown clearly in different view angles by this data processing method. (2) The deformation width on both sides of the fault zone is about 400 km with the maximum movement value of 15 mm/a. However, 2/3 of the movement distribute in a belt area about 100 km width along the faults. This clearly shows the distribution of slip movement and shearing strain accumulation from the motion isogram. (3) The deformation on southern part is more than that on northern part of Eastern boundary zone of Sichuan - Yunnan Block showed by the gradient variation map of slip movement. (4) In perpendicular direction to the fault there is not clearly different deformation between two sides of the zone.

Key words: GPS; Data processing method; Gradient variation; Active fault zone; Eastern boundary zone of Sichuan - Yunnan block

0 引言

GPS 技术的成熟与应用普及使地壳运动与地球

动力学的研究生机勃勃。在我国自 1998 年国家重大科学工程中国地壳运动观测网络建成与运行以来,产生了大量的观测数据,相应的应用研究、方法研究结果不断涌现。主要有时间序列方面的研究^[1-2],形变场方面的研究^[3-5]、形变场与地震关系方面的研究^[6-7]、负位错反演与地震预测方面的研究^[8]、数值模拟方面的研究^[9]等。然而,针对以断裂区带为对象的研究从空间的角度来观察则不多见。尽管一些学者开展了对断裂带的活动习性的分段研究^[10]及跨断层形变剖面研究^[11]等,但随着认识的深入与实际的需求显示出不够完善,主要是因为空间上的变化信息或没有得到全面而又充分地体现,或不够一目了然,或简化的成分较重。本文针对断裂区带活动的特点和 GPS 数据资源,试图在前人工作的基础上争取进一步完善形变信息表述模式及实现方法。

1 数据处理与实现方法

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

可建立任一测站的误差方程:

$$\begin{bmatrix} v_{ee} \\ v_{nn} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin(\varphi)\cos(\lambda) & -\sin(\varphi)\sin(\lambda) & \cos(\varphi) \\ \sin(\lambda) & -\cos(\lambda) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了简明起见,对所有测站的误差方程用矩阵表示:

$$V = AX + L \quad (3)$$

在此基础上依据最小二乘法即可组成法方程

$$NX + W = 0 \quad (4)$$

对其求解可获得研究区的欧拉矢量

$$X = -N^{-1}W \quad (5)$$

再利用式(1)即可解算任一测站的 V_e 、 V_n ,进而可获得相应的差异运动:

$$\begin{bmatrix} v'_{ee} \\ v'_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_e - V_e \\ v_n - V_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 V_e 、 V_n 为研究区内任一点 (λ, φ) 的欧拉东向运动与北向运动; v_e 、 v_n 为相应的东向观测运动与北向观测运动; v'_{ee} 、 v'_{nn} 为相应的东向差异运动与北向差异运动; r 为地球平均半径。

通过式(6)我们可获得研究区相对差异运动,以此作为先验速率重新计算以获取差异运动结果 (v'_{ee}, v'_{nn}) 及相应的误差 $(m_e, m_n$ 和 $\rho)$,并在此基础上绘制相应的图件。然而这一结果与图件仅是我们分

析的一个基础。由于我们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,而断裂带的走向是任意方向的,故需要进行投影或转换计算。根据断裂带两侧块体主要表现为走滑活动、正断层活动或逆断层活动,可通过旋转将直角坐标某一轴平行于断裂带的走向,另一轴垂直于断裂带的走向,对 v'_{ee} 、 v'_{nn} 实施计算。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:

首先要求解研究区的整体运动并剔除,由此来获得研究区的相对差异运动。根据欧拉模型

析的一个基础。由于我们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,而断裂带的走向是任意方向的,故需要进行投影或转换计算。根据断裂带两侧块体主要表现为走滑活动、正断层活动或逆断层活动,可通过旋转将直角坐标某一轴平行于断裂带的走向,另一轴垂直于断裂带的走向,对 v'_{ee} 、 v'_{nn} 实施计算。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:

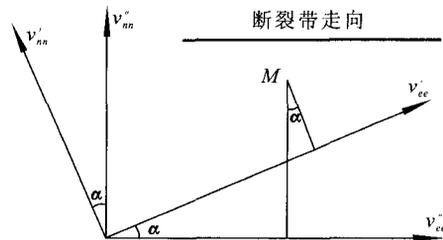


图 1 坐标系及坐标变换示意图

Fig. 1 Coordinates system and its transformation.

$$\begin{cases} v_{ee}'' = v_{ee}' \cos \alpha - v_{nn}' \sin \alpha \\ v_{nn}'' = v_{ee}' \sin \alpha + v_{nn}' \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中 v_{ee}'' 和 v_{nn}'' 分别为平行与垂直于断裂带的运动分量; α 为旋转角, 顺时针为正。

对 v_{ee}'' 和 v_{nn}'' 其进行精度评定, 以考察其信息的显著性。根据式(7)及误差传播定律, 有

$$m_{ee}'' = \pm \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot m_e'^2 + \sin^2 \alpha \cdot m_n'^2 - 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot m_{en}'} \quad (8)$$

$$m_{nn}'' = \pm \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot m_e'^2 + \cos^2 \alpha \cdot m_n'^2 + 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot m_{en}'} \quad (9)$$

式中 m_e' 、 m_n' (及 ρ) 可从 GPS 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:

$$m_{en}' = m_e' \cdot m_n' \cdot \rho \quad (10)$$

在实际分析工作中为了方便与直观, 常常将形变量、误差及其它与分析有关的要素 (如断裂带、甚至地形地貌等) 绘制成图件, 为统一坐标系, 需要对上述转换的两种运动量及其相应的误差换算到原坐标系下。由图 1 可知, 平行于断层的运动量其在 v_{ee}'' ov_{nn}'' 坐标系下的坐标为 $(v_{ee}'', 0)$, 垂直于断层运动量的坐标则为 $(0, v_{nn}'')$ 。顾及式(7), 则平行于断层运动量在原坐标系下的分量为

$$\begin{cases} v_{e1} = v_{ee}'' \cos(-\alpha) \\ v_{n1} = v_{nn}'' \sin(-\alpha) \end{cases} \quad (11)$$

其相应误差变换的计算式为

$$\begin{cases} m_{e1} = m_{ee}'' \cos(-\alpha) \\ m_{n1} = m_{nn}'' \sin(-\alpha) \end{cases} \quad (12)$$

同理, 垂直于断裂带的运动量及其误差变换的计算式为

$$\begin{cases} v_{e2} = -v_{nn}'' \sin(-\alpha) \\ v_{n2} = v_{ee}'' \cos(-\alpha) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} m_{e2} = -m_{nn}'' \sin(-\alpha) \\ m_{n2} = m_{ee}'' \cos(-\alpha) \end{cases} \quad (14)$$

考虑到图件的美观、简洁与信息的全局, 在绘图时误差量的正负应取决于位移 (运动) 的矢量方向, 即误差分解量的正负随位移 (运动) 分解量的正负即可。这样不仅减少了图件中的不必要因素, 还可直接地观察位移 (运动) 的显著性 (用不同的颜色或深浅度表示, 图 2、3)。通常绘图时虽然给出矢量的比例长度, 但定量观察时仍觉得不十分方便。由于这里已经是同方向的矢量 (或平行、或垂直), 所以还可在同一类图里绘上描述大小的等值线, 见图 2、

3。等值线的绘制可以用 surfer 软件等, 在此不再赘述。除此之外, 考虑到信息的全面性, 进一步计算绘制相应的梯度图。根据梯度的定义

$$\text{gradu}(x, y) = \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} i + \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} j \quad (15)$$

$$|\text{gradu}(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial u(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (16)$$

可分别计算平行和垂直断裂带空间任一点的梯度值。其中解析式 $u(x, y)$ 的获取可参考文献 [12] 所给出的方法, 也可根据其它数值逼近理论获取。得到梯度值后可绘制等值线图。

2 川滇东边缘断裂带及周围活动简析

川滇地区是我国地震活动最为频繁和强烈的地区之一, 中国地壳运动网络在此布设了较密集的 GPS 流动测站。现以 1999 - 2004 年的观测资料为例进行分析。由于计算是以 ITRF 为参照的运动结果, 不利于直接分析与观察, 故根据式(1 - 6) 采用区域无旋转方法获得研究区的相对差异运动结果, 如图 2 所示。

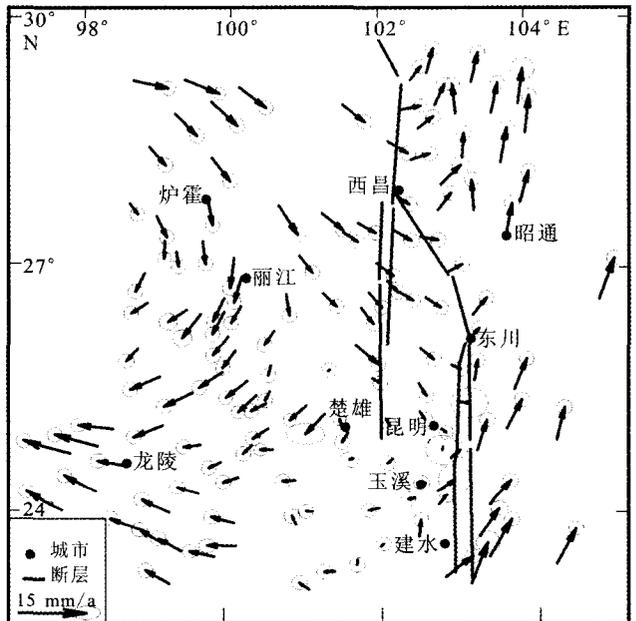


图 2 川滇地区 1999 - 2004 年相对于区域无旋转基准的运动结果

Fig. 2 The crustal movement on Sichuan - Yunnan region relative to no-net-rotation reference frame in 1999 - 2004.

由图 2 可知, 该地区水平运动在空间上的变化是很有序的, 最大形变区带分布在川滇菱形块体的

东边界上,其它地域的差异活动较弱,说明东边界是该区近代地壳构造活动最活跃部位。若观察东边界东西两侧的相对运动,则该断裂及附近地域的差异性运动均在 10 mm/a 以内,活动方式为左旋,向两侧延伸这种差异运动在扩大,最大可达 15 mm/a。它反映了该边界的活动并不纯粹具有走滑特性,还

兼有较大的剪切变形的成分。进一步观察还可知该地区的运动中既含有显著的变形分量,也含有刚性分量。边界带西侧的点位运动方向恰好与青藏高原物质进入该区的流动方向一致,向南运动在丽江处部分向南东运动,部分继续向南,到达龙陵附近遇到阻隔转向西。这是该区运动的基本特征。

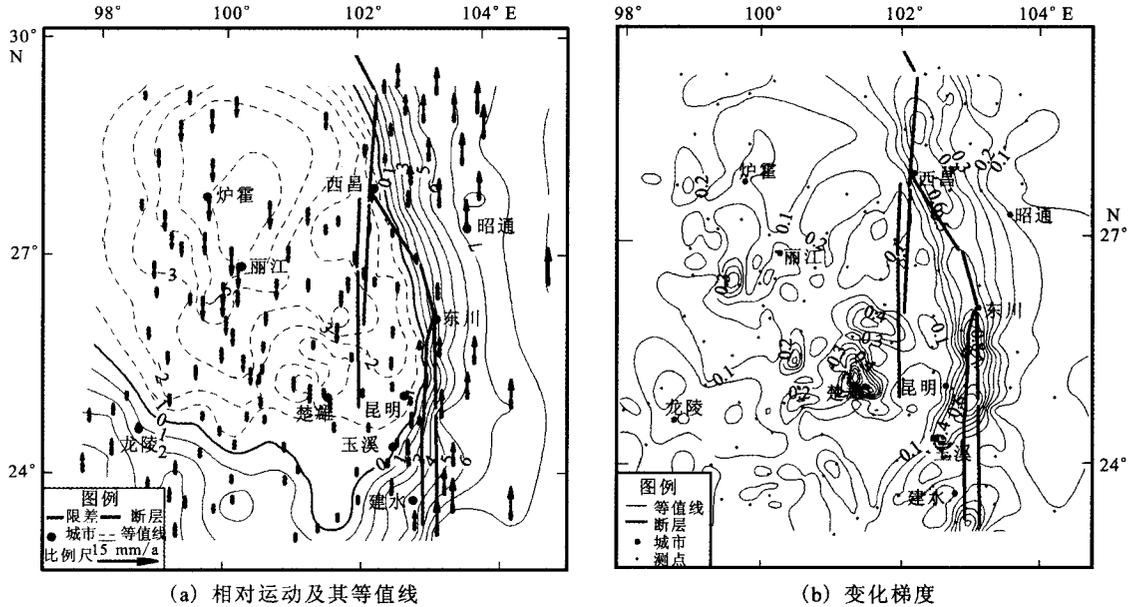


图3 平行于断裂带的相对运动及其等值线和变化梯度

Fig. 3 The relative movement to be parallel to fault, and its isogram and change gradient.

为进一步了解形变变化在空间上与断层活动的关系,利用上述有关公式给出了相关的结果,见图3、4(梯度单位: mm/10 km · y⁻¹)。

图3(a)展现了平行于川滇块体东界断裂带的运动(即走滑性运动)与等值线;图3(b)为变化梯度。可看出,沿鲜水河、则木河、小江断裂形成了一个正负等值线的分界带,等值线的展布方向基本上与该带平行且形变梯度大,表明该带是东西两块体相对运动的分界带。同时还显示该带的形变活动存在于以断层为中心的具有一定宽度的空间上。东侧向东形变的变化量逐渐变小(图3(b)),至昭通时基本上完成了较快的形变变化,再向东形变量的增加已经很缓慢了。这说明昭通东侧介质刚性特征相对突出些,其西侧除断层走滑活动外其余属形变活动。该带西侧的较快形变变化部分主要位于该带附近,其它空间的形变变化相对宽缓,形变最大值位于炉霍至丽江一线。尽管东西两块最大运动差达 15 mm/a,但其中近 10 mm/a 的变化分布在断裂带及其附近大约 1 度的空间跨距上。西侧块体向南的运动向南变得越来越小,至其南端时已变成北向运动,这表明物质的逃逸在南端受到了阻挡而改道向西(图

2)。仔细观察可知,这种阻挡在南端也并非均等,表现东西两端大中间小的格局,这可能与红河断裂带的活动有关。

从地震的孕育角度看,这种在断裂带附近南北向背离运动是断层具有走滑运动的体现,但由断裂带附近区域运动等值线及梯度变化可知这并非只是断层上的孤立运动,在断裂带及附近地域同时也有剪切应变的存在与积累,具备地震孕发的条件。一般地高形变、高梯度的地域在中短期内往往是中强地震活动的主要场所,而在高形变、高梯度的背景下存在低形变、低梯度的地域则有可能是强震活动的场所,所以断裂带的中北段应更值得重视。

图4(a)为垂直于川滇块体东界断裂带的相对运动(即张压性运动)及其等值线;图4(b)是其运动变化的梯度。据此我们很难辨别垂直于断裂带的运动与断层有什么关联性,因为不但运动的大小在断裂带附近大体相当,而且其梯度变化也较缓慢。确切地说,运动大小的空间分布与断裂带的活动没有直接关系。在研究区北部表现为“西大东小”的变化特征,变化最大的部位在离开断裂带的西侧块体上(图4(b)),表明该局部区域是北部挤压变形

最大的区域(炉霍以北)。向南运动的大小与方向也在发生变化,至龙陵及其西部地区时反向运动达到最大。但变化最大的部位并不在此。在炉霍-丽江-楚雄-玉溪一线存在一个较明显的北西向运动变化梯度条带,同时也是运动性质差异变化的条带。然而该形变条带并非是断裂构造活动带(至少目前还未发现)。这可能是由该区不同断层共同控制造

成了这种复杂的形变形态。事实上,近几十年该条带上已多次发生强烈地震,或许与此形变背景有某种联系。此外,从表面上看研究区南部似乎存在着相对拉张运动,参考图2和图3(a),看出是由于来自北部物质的逃逸与推挤在南端受到阻挡而形成的东西向挤出所致。

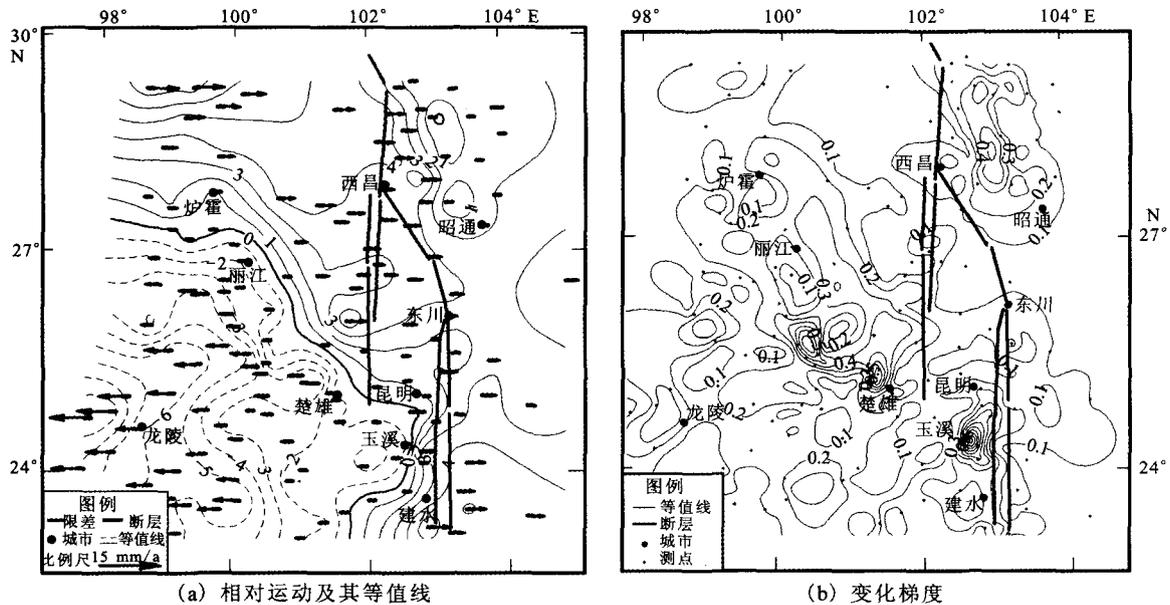


图4 垂直于断裂带的相对运动及其等值线和变化梯度

Fig. 4 The relative movement to be perpendicular to fault and its isogram and change gradient.

3 结语

综上所述,获得研究区相对差异运动(图2)可使我们对该区运动的概貌有较好的了解。然而在实际工作中除了研究运动场的整体变化外,还常常要结合断裂带(层)分析其走滑、张压活动的特征与习性,及其相应的形变在空间上变化分布,并由此进一步判定活动是否属于正常还是进入运动亏损或闭锁状态,以及在此基础上确定相应的空间位置等。本文所给的方法有利于这样的分析。应该指出,在变形机制的解释上不应离开研究区的整体运动(如图2),否则有可能得出不客观的看法。文中虽以断裂

带构造活动为主对川滇地区形变给出了分析,但还较为粗浅,意在方法的应用。尽管如此仍可使我们对断裂带构造活动及在空间上的关系有了更加清晰的认知。可将本方法用于不同时段运动、形变等进行对比演化分析上,因为当断裂带(层)活动发生变化时,并不一定都体现在断裂带(层)的空间某部位上,还可能体现在断裂带(层)的某时段活动上。

致谢:本项工作是在杨国华研究员指导下完成的,并在本文的形成过程中又提出了详细的建议与修改意见,在此谨表感谢。

(下转 225 页)

[参考文献]

- [1] M Popescu. A suggested method for reporting landslide remedial measure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the environment, 2001, 60(1): 58-62.
- [2] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节. 交通荷载作用下软基加筋道路变形机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 129-134.
- [3] 姚海林, 卢正, 罗海宁. 交通荷载作用下 kelvin 地基上不平整路面的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 891-896.
- [4] 章东强, 谢伟平, 于艳丽. 交通荷载引起的环境振动实测与分析[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(9): 57-59.
- [5] 查文华, 洪宝宁. 交通荷载下低路堤路基的动力响应[J]. 江苏大学学报, 2008, 29(3): 264-268.
- [6] 查文华, 洪宝宁, 徐毅. 交通荷载下低路堤高速公路路面路基振动测试与分析[J]. 公路工程, 2007, 32(4): 113-117.
- [7] 刘奉喜, 刘建坤, 房建宏, 等. 车辆荷载作用下盐路公路振动衰减分析[J]. 公路, 2004, (4): 24-28.
- [8] 樊秀峰, 简文彬. 交通荷载作用下边坡振动特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增): 1197-1201.
- [9] 郑黎明. 铁路边坡岩体的振动特性和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(1): 69-78.
- [10] 张友葩, 高永涛, 王杰林. 动荷载下边坡的失稳分析[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(2): 110-116.
- [11] 金亮星, 李建. 高速铁路路堑岩质边坡的动力响应分析[J]. 振动工程学报, 2008, 21(4): 354-358.
- [12] 简文斌, 胡志忠, 樊秀丽, 等. 边坡对循环荷载的响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2562-2567.
- [13] 叶四桥, 唐红梅, 李明. 汽车荷载对滑坡稳定性的影响分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 106-109.
- [14] 蒯行成, 吾朝辉, 李永红. 车辆振动瞬态分析及动荷载[J]. 中南公路工程, 2004, 29(3): 41-44.

(上接 219 页)

[参考文献]

- [1] 敬少群, 吴云, 乔学军, 等. GPS 时间序列及其对昆仑山口西 8.1 级地震的响应[J]. 地震学报, 2005, 27(4): 394-401.
- [2] 顾国华, 张晶. 中国地壳运动观测网络基准站 GPS 观测的时间序列结果[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 61-67.
- [3] 张跃刚, 帅平, 胡新康, 等. 从 GPS 观测看华北地区的形变场演化[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1): 36-41.
- [4] 江在森, 张希, 崔笃信, 等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 636-644.
- [5] 殷海涛, 李杰, 张玲, 等. 基于 GPS 观测网的山东地区地壳运动特征分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 276-281.
- [6] 杨国华, 江在森, 刘峡, 等. 华北地区水平运动场动态特征及其与昆仑山 8.1 级地震的可能关系[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 6-10.
- [7] 杨国华, 王敏, 韩月萍. 华北中北部地壳运动与张北地震[J]. 中国地震, 2001, 17(3): 301-311.
- [8] 张希, 江在森, 王琪, 等. 青藏块体东北缘弹性块体边界负位错反演与强震地点预测[J]. 地震学报, 2005, 27(6): 620-629.
- [9] 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 33-38.
- [10] 黄立人, 郭良迁, 马青. 华北 GPS 网复测结果的初步分析[M]. 北京: 地震出版社, 2001, 218-227.
- [11] 杨国华, 王琪, 王敏, 等. 云南地区现今地壳水平运动与变形特征[J]. 大地测量与地壳动力学, 2003, 23(2): 7-14.
- [12] 杨国华, 江在森, 武艳强, 等. 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, 2005, 29(4): 6-10.
- [13] 胡新康, 王倩, 马青, 等. 区域无整体旋转基准的研究与应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 52-60.