

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^{*}

杨国华¹, 张晓东², 张风霜¹, 杨 博¹, 韩月萍¹, 王 利¹, 沈舞春¹

(1. 中国地震局第一地形变监测中心, 天津 300180 2. 中国地震台网中心, 北京 100036)

摘要: 利用“中国地壳运动观测网络”基本站自 1998 年运行以来积累的观测资料, 以 2001 年 11 月昆仑山口西 8.1 级地震前的所有资料计算的运动结果为基本参考, 分别计算了 2002 年相对于 2001 年和以后几年相对于 2002 年的测站累计偏离位移变化结果, 据此对昆仑山口西 8.1 级地震震时和震后中国西部水平运动场的变动进行了观察。结果表明: ① 以发震断裂为界, 震时南侧的西藏地区发生了由北至东的偏离位移, 数值超过 10 mm; 北侧的新疆地区发生了 NW 向的偏离位移, 最大值也超过了 10 mm; ② 震后 (从 2003 年算起) 左旋性质的偏离位移是断断续续的增加, 截止到 2005 年, 距震源最近的 JB51 (发震断裂南侧) 和 JB30 (发震断裂北侧) 站的地形变化最大, 相对达 70 mm; ③ 震后发震断裂以南的西藏地区优势偏离位移向东, 以北新疆地区的优势偏离位移向北北西, 距震中越近偏离越大; ④ 2006 年, 距震源最近的 JB51 和 JB30 站的偏离位移似乎有向反向移动的迹象, 西藏地区基本上没有新的偏离, 新疆地区的 WNN 向偏离位移似乎仍在进行。尽管地震发生距今已 5 年多了, 但有关迹象表明, 地壳水平形变场的有序调整可能尚未完全结束, 也不排除震前西藏地区的运动由于孕震的缘故而略有所减慢的可能。

关键词: 昆仑山口西 8.1 级地震; GPS 偏离位移; 响应与调整; 中国西部

中图分类号: P315.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)01-0077-06

0 引言

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 (90.9°E 36.2°N) 发生 8.1 级巨大地震, 这是近半个世纪以来我国大陆所发生的震级最大的地震事件 (中国地震局监测预报司, 2002)。该地震沿东昆仑断裂形成了长达 426 km 的地震地表破裂带, 最大地表同震左旋水平位移为 6.4 m (陈杰等, 2003)。根据 GPS 剖面监测资料发现, 震后发震断裂带南盘向东方向明显移动 (乔学军等, 2002)。任金卫等 (2005) 根据震后不久所取得的场地监测资料和科学考察成果指出: 该次地震震后最初两周内断层蠕动位移约占观测期内 (近 1 年) 总位移量的 47%, 其后半年多的时间内断层蠕动位移量不到总观测量的 40%, 后 5 个月时间内断层蠕动位移量只占总观测量的 13%, 同时认为地震地壳形变的范围大致为 88°~97°E 32°~38°N 江在森

(2003)、顾国华等 (2003) 对有关问题也进行了讨论。实际上, 有关该次地震与地壳形变关系的研究不止这些, 但这些研究具有代表性。

最近的有关研究表明或暗示着上述研究成果可能主要体现了近场、中场和震后较短时间跨度的昆仑山口西地震地壳形变的响应结果, 而对于远场响应、震后较长一段时期的调整以及影响的空间范围很可能未涉及周全 (杨国华等, 2007)。从这种意义上讲这些研究就显得不够充分和完善, 这主要是因为我们对此缺乏更多的实际体验, 而这种体验需要较长的时间和更多的相应监测资料, 而不完全是理论上的。随着 GPS 基准站和基本站资料在时间轴上的积累 (基本站每年监测一期) 和信息提取与分离方法的逐步完善, 使我们有可能确切地弄清该地震对中国西部地壳形变的影响及每年的动态变化等问题, 并进一步探讨它们与未来一段时间内地震活动趋势等的关系。这是本项工作的一个基本思想。

* 收稿日期: 2007-06-22

基金项目: 国家科技支撑“强震监测预报技术研究”项目和地震科学基金课题 (A07066)

1 资料与处理方法

“中国地壳运动观测网络”工程在中国西部布设了 40 余个基准站和基本站。尽管密度较低，但分布比较均匀，而且资料的连续性和复测周期相对也比较理想，若采用较恰当的数据处理模式，获取我们所需要的信息是完全可能的。

GPS 前期数据处理主要用 GAMIT GLOBK QOCA 软件完成，大体可分为 4 个步骤：① 利用 GAMIT 软件获得测站坐标和卫星轨道的单日松弛解，若同步观测的测站较多时，则采用分区处理；② 利用 GLOBK 软件将获得的每天单日松弛解和 IGS 数据中心 SOPAC 产出的全球 IGS 跟踪站的单日松弛解合并；③ 利用 QOCA 软件综合 1998 ~ 2001 年所有的单日松弛解计算测站的位置和移动的速度；④ 以 1998 ~ 2001 年测站的运动速度作为时段性背景场进行约束，利用 2001 ~ 2002 年和 2002 ~ 2006 年的资料计算偏离背景的地震响应位移场（震后 1 年以内）和震后调整位移场（震后 1 年后以来）。计算时采用 IIRF2000 的速度解作为约束。在参考站的选择上，尽量选择相对于中国大陆分布较均匀的国际站，同时兼顾运动的平稳性和观测误差应较小的因素。对它们的约束，计算速率时东西向和南北向为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mm/a}$ ，垂向为 $4.0 \sim 5.0 \text{ mm/a}$ 。

在实际计算时，我们利用全国的基准站和基本站资料。为了便于观察，在获得 1998 ~ 2001 年的速率结果后，借用中国大陆整体无旋转基准方法剔除了整体运动，以凸现其空间上的差异运动。计算偏离位移场时用 IIRF2000 的速度解作为约束即可，无需采用其它的归算就可获取我们所需的形变信息，并可确保所获信息的客观性。具体分析时我们仍然面向中国西部地区。

2 水平运动背景与地震形变响应场的特征

2.1 时段性背景水平运动场

图 1 是依据 1998 ~ 2001 年测站所计算的、剔出整体运动后的差异运动结果。换句话说，它是相对于中国大陆整体无旋转基准的水平运动场（杨国华等，2005；胡新康等，2007）。它所显示

的是地震前这一时段的平均运动结果。由于地震发生于中国西部地区，所以地震的前几年该区的运动不一定能够较好地体现该区正常状态的运动，即所谓常态运动，但为了获取时间轴上各站的差异变化，故不妨称该阶段的运动为时段性背景水平运动。以此为参照，可获取震后不同时间段的偏离位移。

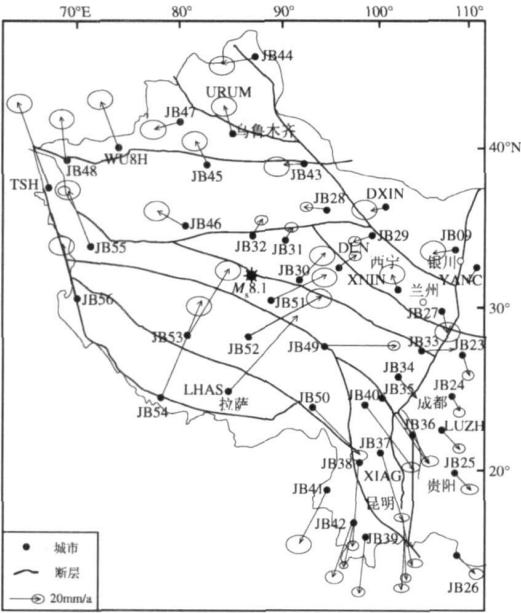


图 1 1998 ~ 2001 年中国西部相对于中国大陆整体无旋转基准的水平运动场

中国西部地区不仅是强震多发区，而且也是地壳强烈形变区（李延兴，2004；杨国华，2002）。从图中的结果来看，大致以发震断裂为界，北侧地区由东向西的运动方向为西向运动，然后逐渐变为北西向，到新疆的西端则变为北北西向；但靠近发震断裂的东北侧运动方向则表现为北东向；就运动的大小来看，基本上表现为“西大东小”的形变特征，数值为每年几毫米至 10 mm 。南侧地区基本上是青藏高原地区和川滇地区，从结果可以看出该区是我国大陆地壳形变与运动最突出的地区。青藏高原向北运动的量级在南端超过了 20 mm/a ，运动方向接近北向，并呈扇形展布。西部的运动方向几乎为正北，向东延伸运动方向也逐渐向东偏转，到东端已转到东向运动。川滇地区的运动方向由北向南为东南—南—西南，它的运动量级从北端的接近 20 mm/a 变到南端的近 12 mm/a 。尽管变化比较大，但从整体的

有序性来看, 存在一个顺时针旋转的运动成分。这反映了川滇地区地壳运动呈“挤出”与“变形”的双重特征, 但就形变来看, 该区居中国大陆形变之首。这是中国大陆西部地区水平形变的基本特征。下面关于地震响应与调整的形变场就是在这—基础上得到的。

2.2 地震响应与调整的偏离位移场

一般而言, 地震震级很高, 其影响范围也会很大。这就是说由于地壳原有的环境应力状态被打破, 而新的、相对平衡的应力状态并不会立即形成, 所以必然会存在一个应力调整的过程。这种调整或调整过程也必然会通过地壳形变的形式作出一定程度的反映。由于 GPS 基本站每年复测一次, 这就为我们提供了了解地震形变场动态变化的机会 (图 2~3)。

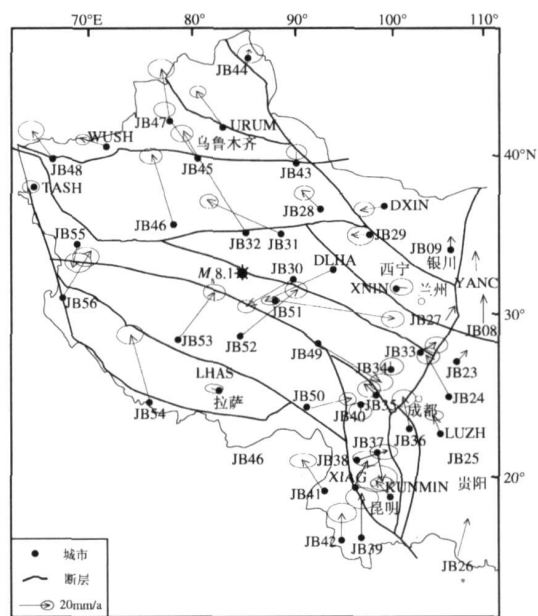


图 2 2002 年相对于 1998~2001 年运动速率的同震形变位移场

图 2 是 2002 年偏离地震之前运动场 (1998~2001 年) 的位移结果, 由于观测时间距地震发生时间较近, 所以位移结果在较大程度上反映了同震形变场的结果。发震断裂以南的西藏地区在这一时间段以北东向位移为主, 量级约 10 mm, 运动场向东延伸, 位移方向也发生了变化, 逐渐变为东—东南向, 数值也有所加大; 进入到南北地震带, 其位移变化就比较复杂。由于该带是中国大陆水平形变的消减带, 所以在东西向挤压的边界

作用下具有南北向变长的形变性质, 偏离位移也是这样, 但量级似乎偏小, 这可能与该带区域应力场和地壳介质的物理性质与构造有密切的关系。然而, 南北地震带的南端 (云南地区) 的偏离位移并没有向南, 却指向北。这说明, 中国西藏地区的南界整体有一个向北加速的位移, 且这种性质的位移甚至延至南北地震带的南端 (但程度已明显减慢减弱); 然而, 由于地震所造成的形变 (另一种位移) 从理论上讲会导致该区产生向南的位移 (但这需要一个时间过程), 所以其北向整体推进的位移在此时段内仍占优势。发震断裂带以北的西部区域向北西向移动, 距震源区较近的测站位移 (约 300 km) 甚至超过了 20 mm; 随着向北的深入, 偏离位移也越来越小。发震断裂带以北的东部区域整体向西向移动, 除距震源较近的测站位移较大外, 其它地域则不太显著, 但整体性却较好。同震形变的这一结果与发震的逆冲性左旋破裂活动是一致的。

为了考察震后的调整过程, 图 3 除了相对于 1998~2001 年运动速率外, 又剔出了震时的形变结果 (即图 2 的结果), 这样可能会使我们对时段变化看得更加清楚。图 3a 是地震 1 年多之后 (2003 年) 调整的趋势结果。由此可知, 发震断裂带的左旋活动在背景的基础之上, 虽经震后的 1 年多时间, 其左旋超常规活动 (震前) 不但未停止, 而且仍在持续增加; 距震中较近并位于断裂南侧的 JB51 站向东的位移量已达到了 35 mm, 其北的 JB30 站 (位于断裂带以北) 向西移动了近 10 mm。这就是说, 在此区段和此期间上的左旋活动已超过了 40 mm。这是我们获得的一个基本结果, 此外我们还观察到, 地震破裂带以南的西藏地区在这一期间由震时的北东向位移变为整体向南东东的位移, 但数值并不算太大, 约 5 mm; 川滇地区这时开始出现了来自于东南向推挤的迹象, 但还未波及到滇南地区; 地震破裂带以北的新疆地区, 似乎有弹性回跳的迹象, 但数值上不够突出。

图 3b 是震后的 2003 和 2004 两年累计调整的位移场结果。发震断裂带的左旋活动量 (JB51 与 JB30 站的相对结果) 同 2003 年基本一样, 这说明 2004 年没有明显的增量。地震破裂带以南的西藏地区的位移基本向东, 累计的结果较 2003 年大, 并且显露出“北大南小”的迹象; 进入到川滇地

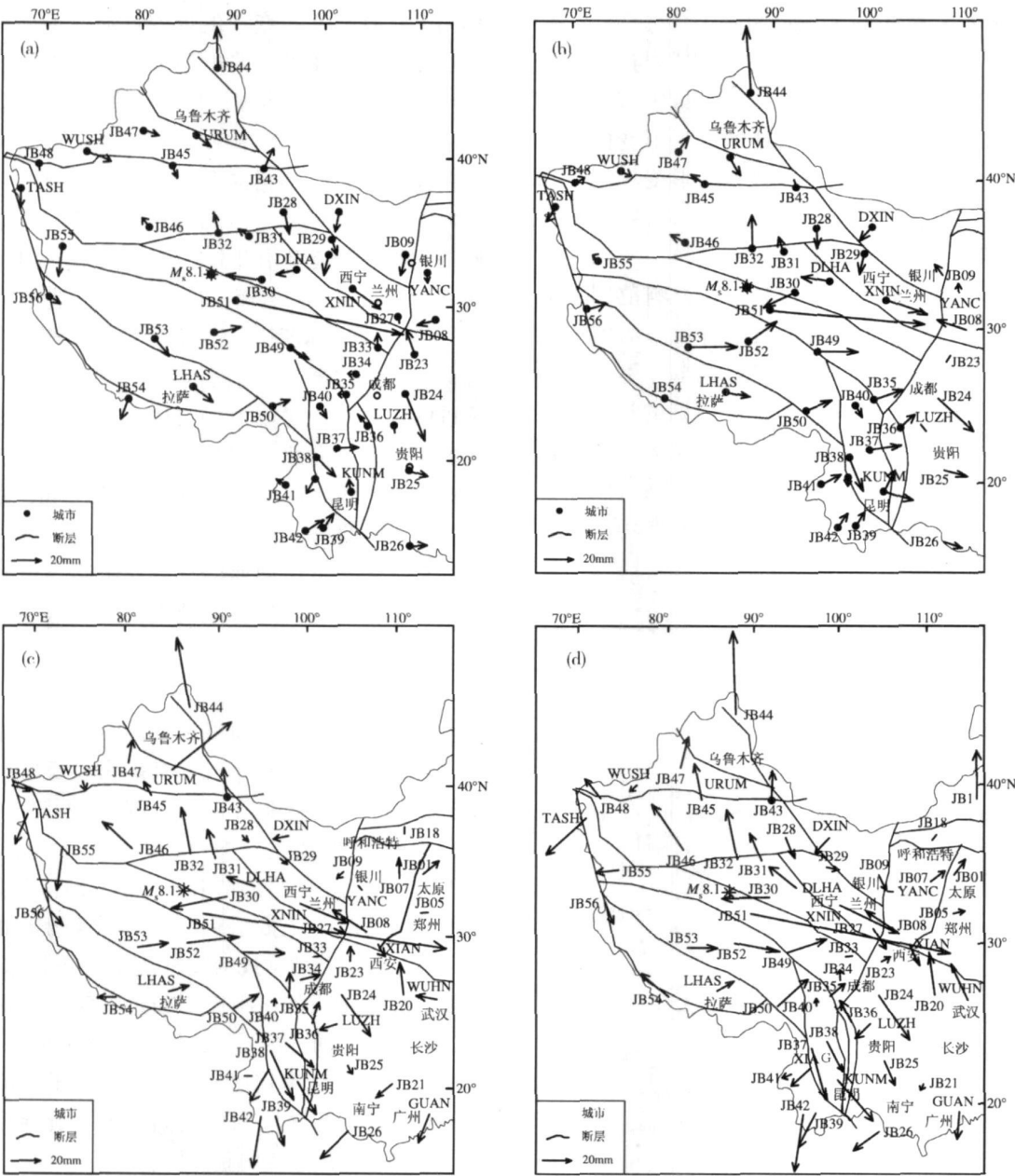


图 3 相对运动速率并剔出同震形变的位移场

(a) 2003年相对于 1998~2001年; (b) 2003~2004年相对于 1998~2001年;
(c) 2003~2005年相对于 1998~2001年; (d) 2003~2006年相对于 1998~2001年

区,其位移已变得比较明显。这表明在 2003 年的基础上,2004 年地壳形变存在着持续的增量活动。然而,地震破裂带以北新疆地区的累计结果显得并不突出,这至少说明 2004 年没有出现可辨别的增量变化。

图 3 是震后的 2003~2005 年累计调整的位移场结果。在此期间的 2004 年底,印尼发生了 8.7 级巨震,这一事件的出现对中国西部会产生一些

影响,但有关研究表明这种影响的范围主要在川滇地区(杨国华等,2006)。从图 3^c中所显示的结果来看已与图 3^b有所差别。最明显的是川滇地区,实际上它是昆仑山地震和印尼地震双重影响的结果,在该区的中南部位移数值已达到 10 mm;但已难以区分它们各自的影响结果。西藏地区的位移结果较图 3^b的结果略大,这时的东向位移方向一致性更加突出。新疆地区也与以前有所不同,

累计调整结果以北西向为主, 这说明 2005 年的调整幅度比较大。发震断裂带的左旋活动量由以上的 40 余毫米变至 70 mm, 这也是一个很大的变化。总的来说, 2005 年中国西部地区的调整变化量是比较明显的。

2006 年发震断裂带的左旋活动似乎有点逆向, 若考虑观测误差的影响, 则基本上是一致的, 这可从图 3 d 与图 3 c 的对比中看到这一点。同样, 西藏地区的变化也不突出, 基本上是 2003 ~ 2005 年的累计结果。有所不同的是新疆地区, 在原有位移的基础上有所增大, 方向与前一致。

3 讨论与结论

以上给出了自昆仑山口西地震以来 (2002 ~ 2006 年) 中国西部地壳的动态变化结果。从中可获取一些认识: ① 西藏地区震时形变与震后调整的形态有较大差异; ② 从发震断裂带的活动来看, 除震时 (2002 年) 的活动外, 震后 (2002 年以后) 的调整至少延续到 2005 年, 而且量级相当可观, 从时间过程看, 并不一定是线性变化的, 有“走走停停”的迹象; ③ 发震断裂以南的西藏地区震时北向位移分量比较突出, 然而震后调整的位移方向基本上是东向的, 若估计误差的影响, 其调整过程基本上是线性的; ④ 发震断裂以北的新疆地区震时位移方向表现为北西向, 震后调整的累积位移方向与震时基本上是一致的, 但在调整过程中有弹性回跳的迹象; ⑤ 2005 年变化较大, 或许与印尼地震有关, 在川滇地区主要是直接影响的关系, 其它可能是激发的关系; ⑥ 昆仑山口西地震的影响范围较大, 可能超出我们的想象 (杨国华等, 2007); ⑦ 这样的调整有利于川滇地区 and 新疆西部地区的能量积累。但由于测站较少, 我们只能进行特征性分析, 所以结论显得较为粗略。

上述认识存在一些问题, 比如以震前 1998 ~

2001 的结果为基本参照是不是合适 (限于观测资料的时间积累, 我们只能这样做)。也就是说这一结果能否代表正常场的结果, 上述结果只能是差异对比结果, 若能则不仅具有差异对比的含义, 同时也有偏离正常场的偏离含义等。此外, 现在的监测结果与以前的理论认识并不完全相应, 尤其是震后的衰减性变化等。本文的意图是希望引起大家对西部地壳运动的关注, 使讨论深入, 因为这对我们来说毕竟是刚刚开始, 尤其是对中国大陆地区。

参考文献:

- 陈杰, 陈玉坤, 丁国瑜, 等. 2003. 2001 年昆仑山口西 $M_{\text{s}}8.1$ 级地震地表破裂带 [J]. 第四纪研究, 23 (6): 629—639.
- 顾国华, 张晶, 王武星. 2003. 关于 2001 年昆仑山 8.1 级大地震前后中国大陆水平运动的讨论 [J]. 地震学报, 25 (6): 653—660.
- 胡新康, 王倩, 马青, 等. 2007. 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, 27 (2): 52—60.
- 江在森, 张希, 祝意清, 等. 2003. 昆仑山口西 $M_{\text{s}}8.1$ 地震前区域构造形变背景 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (增刊): 163—172.
- 李延兴, 李智, 张静华, 等. 2004. 中国大陆及周边地区的水平应变场 [J]. 地球物理学报, 47 (2): 222—231.
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林, 等. 2002. 昆仑山口西 $M_{\text{s}}8.1$ 级地震的地壳形变特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 22 (4): 6—11.
- 任金卫, 王敏. 2005. GPS 观测的 2001 年昆仑山口西 $M_{\text{s}}8.1$ 级地震地壳形变 [J]. 第四纪研究, 25 (1): 34—44.
- 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, 25 (4): 6—10.
- 杨国华, 江在森, 王敏, 等. 2006. 印尼地震对我国青藏高原东北缘地区地壳水平活动的影响 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (1): 9—14.
- 杨国华, 江在森, 刘广余, 等. 2007. 华北地区水平运动场于昆仑山 8.1 级地震的可能关系 [J]. 大地测量与地球动力学, 27 (2): 10—5.
- 杨国华, 李延兴, 韩月萍, 等. 2002. 中国西部地壳现今变形特征及其机制 [J]. 测绘学报, 31 (4): 292—299.
- 中国地震局监测预报司. 2002. 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震 [M]. 北京: 地震出版社, 24—34.

The Variation Characteristics of the Crust Horizontal Displacement Field in the West of China After Kunlun Mountain M_s8.1 earthquake

YANG Guo-hua, ZHANG Xiao-dong, ZHANG Feng-shuang,

YANG Bo, HAN Yue-ping, WANG Li, SHEN Wu-chun

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

(2. China Earthquake Networks Center, CEA, Beijing 100036, China)

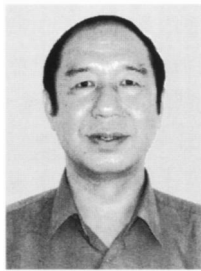
Abstract

Since the basic stations of "China Crust Movement Measuring Network" run in 1998, the accumulated data are used to calculate movement results by all data before 2001 (before the Kunlun Mountain M_s8.1 in November of 2001) are taken as the basic reference; we have respectively calculated the accumulated departure results of 2002 relative to 2001 and the succeeding several years relative to 2002. Based on this, the changes of the horizontal movement field in the west of China have been observed while the Kunlun Mountain M_s8.1 earthquake occurred and after the earthquake. The results suggest: ① Bounded by the seismic outbreak fault in Tibet area of the south side, the departure displacement from north to east took place when the earthquake occurred, and the departure amount even exceeded 10mm; while in Xinjiang area of the north side, the departure displacement of the direction of NW took place, and the maximal amount also exceeded 10mm; ② After the earthquake (from 2003), the average departure displacement increased off and on, the variation of JB51 (south side of the fault) and JB30 (north side of the fault), which are the closest two stations to the epicenter, reached the largest up to 2005, and the relative amount was 70mm; ③ After the earthquake, the preponderant departure displacement of Tibet area, which is to the south of the seismic outbreak fault, was eastward, while Xinjiang area, which is to the north of the seismic outbreak fault, was NNW, and the more close to the epicenter, the more large of the departure; ④ The departure displacement of JB51 and JB30, which are the closest two stations to the epicenter, apparently had an evidence of reverse motion, and there wasn't new departure in Tibet area basically, while in Xinjiang area, the departure displacement of the direction of WNN was apparently developing. Anyhow, though until now there has been more than 5 years since the earthquake occurred, the correlative evidence indicates that the ordinal adjustment of the crust horizontal deformation field probably doesn't end completely, but we also don't exclude the possibility that the movement in Tibet area slowed appreciably as a result of gestating seism before the earthquake.

Key words: Kunlun Mountain M_s8.1 earthquake; GPS; Departure displacement; response and adjustment; west of China



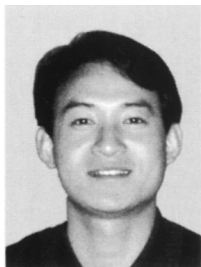
杨国华 中国地震局第一监测中心研究员。1982年毕业于武汉测绘学院大地测量系。现主要从事地震预测、地壳动力学及GPS应用技术研究。



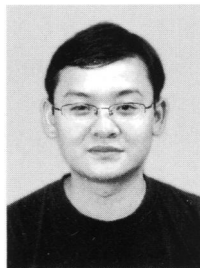
张宏志 中国地震局地球物理所副研究员。1978年毕业于北京大学地球物理系。主要从事数字地震观测资料处理、参数测定及相关研究工作。



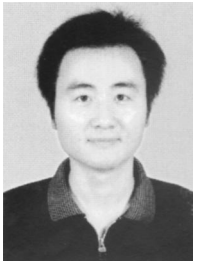
杨清湖 台湾省屏东县消防局防灾企划课课长。1989年毕业于警官学校消防系,2006年9月起在屏东科技大学土木工程系攻读硕士学位。主要从事消防与灾害防救企划工作。



王志勇 山东科技大学讲师。2001年毕业于山东科技大学测量工程专业,获学士学位;2007年毕业于山东科技大学摄影测量与遥感专业,获博士学位。主要从事微波遥感、InSAR及D-InSAR数据处理、摄影测量与遥感等方面的研究工作。



傅再扬 福建省地震局信息网络与应急指挥中心工程师。1996年毕业于防灾技术高等专科学校地球物理专业,2003年取得福州大学计算机科学与技术专业本科学历。主要从事地震应急指挥中心技术系统管理与维护工作。



蔡辉腾 福建省地震局,工程师。2006年毕业于重庆大学土木工程学院防灾减灾工程与防护工程专业,获硕士学位。主要从事地震工程和结构抗震等方面的研究工作。



刘仕锦 四川省地震局康定地震中心站工程师。1991年毕业于北京地震技术专科学校(现为防灾技术学院)。主要从事地震分析预报研究和科技档案管理工作。



徐云马 中国地震局第二监测中心工程师。1998年毕业于长安大学测量工程系。现主要从事重力和地形变研究工作。