鲜水河断裂带北段 GPS 测量及其运动特征

李铁明¹,邓志辉¹,吕弋培²,刘本培³

(1.中国地震局地质研究所,北京 100029;2.四川省地震局,四川 成都 610041;3.武汉大学测绘科技学院,湖北 武汉 430070)

摘要:鲜水河 GPS 监测网由 18 个沿鲜水河断裂带分布的点组成. 1991 年对该网进行了首次观测, 1996 和 2000 年进行了两期整网复测. 本文利用该网 1991 和 2000 年的二期 GPS 观测资料结合 川西地区 20 世纪 70 年代以来的常规大地测量资料,计算给出了这一强震活动带现今运动图像: 由测区的北西虾拉沱测点到南东的乾宁测点水平位移速率逐渐增大,而断层两盘的相对运动不 明显. 表明利用短边 GPS 测量可有效监视活动断裂带两侧一定区域的地壳运动. 对比有形变测 量资料以来川西地区 6 级以上地震分布的特点,认为可根据鲜水河断裂带断层两盘的相对运动 和跨越断层的地壳整体运动的强弱这两种运动图像来研究区域强震的活动特征.

关键词:鲜水河断裂带;GPS 观测;现今地壳形变

中图分类号:P227 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2003)04-0312-07

0 引言

鲜水河断裂带是位于我国川西的一条著名的活动断裂带,自有强震记载以来沿该带发生了多次强烈 破坏性地震,属板内强震多发带.

作为川滇菱形块体的东北边界,鲜水河断裂带大致以乾宁惠远寺拉分盆地为界,可分为北西和南东两 个不同结构的段落.北西段由炉霍、道孚和乾宁三段呈左阶斜列而成,结构较单一,总体走向 NW50°~ 60°.南东段由乾宁—康定主干断裂及其西南侧的色拉哈和折多塘断裂组成,走向 NW10°~30°,结构比较 复杂.对该断裂的现代活动与地震,已有多位学者从地质、地貌和地壳形变测量的角度进行过大量深入的 研究并取得了部分有很高学术价值的成果.如闻学泽等(1989)、唐荣昌等(1993)主要利用地质地貌数据 推算出全新世以来鲜水河断裂带北段走滑速率约10~15 mm/a^[1~2].张存德等(1982)根据断裂带上的形 变资料和一等三角锁的资料分析认为,鲜水河断裂带正处在强烈的剪切应力作用下,这种作用使断裂形成 滑动—闭锁—地震(突发错动)—滑动的循环运动过程^[3].这些结论均为本文用形变测量方法研究鲜水河 断裂带北段现阶段的运动特征提供了重要的研究基础和参考资料.

中国地震局地质研究所于 1972 年在该断裂带上布设了两处跨断层短水准测量场地 ;1973 年炉霍 7.9 级地震后四川省地震局测量队在本断裂带上又陆续布设了 10 处跨断层流动测量场地 ;1987 年后又相继 布设了勾普、龙灯坝等 6 处半坑道式跨断层连续自记蠕变观测台. 自 1991 年开始 ,在该断裂北段又布设了 近 20 个点的 GPS 观测台网(图1),分别是虾拉沱中点三角形、恰叫小三角、道孚 GPS 剖面(其中 DF06 点 与中国地壳运动观测网络区域点 H053 重叠),八美(乾宁)小三角.并于 1991、1996 用 TRMBLE4000SST 接 收机和 2000 年用 Ashtech 大地测量型接收机进行了复测. 本文以 1991、2000 年两期 GPS 观测资料为基础 结合该区常规大地测量资料 ,分析给出该区现今地壳运动状况 ,初步揭示了迄今为止尚未被充分认识 和研究的这条著名的板内强活动断裂带北段主断面近侧的现今活动图像 ,得出了一些较新的认识.

收稿日期 2003-01-20

基金项目 :国家重点基础发展规划项目《大陆强震机理与预测》(95130503) ;国家重大科学工程"中国地壳运动预测网络"资助. 作者简介 :李铁珉(1961 –),男(汉族) ;北京市人 ,副研究员 ,目前主要从事 GPS、地壳形变测量与地震预测方面的研究工作.

1 观测方案

1.1 观测网概况

鲜水河 GPS 测网始建于 1991 年, 于 1991 年、1996 年和 2000 年各观测了 一期,因客观原因后两期个别点未能观 32 测. 每期观测的点位情况见表 1.

1.2 1991年的观测

1991 年4 月 18 日至4 月 25 日利 用4 套双频大地测量型 GPS 接收机 (Trimble 4000SST)开展了鲜水河 GPS 网首期观测. 观测期间每天以两台接收 机固定设置于网的两个远程跟踪点³⁰ XLT0、DF01 上,其它两台仪器在其余 各站上轮流作业,并保证每个流动测站 有两次设站观测机会.4 台仪器每时段 同步观测 2~2.5 小时,采样间隔 15 秒.当时所能观测到的卫星数目较少.

1.3 1996年的观测

1996 年 5 月 4 日至 5 月 9 日用 3²⁸ 套双频 GPS 接收机(Trimble 4000SST) 进行了鲜水河 GPS 网的第二期观测. 观测期间每天还以两台接收机固定设 置于网的两个远程跟踪点 XLT0、DF01 上,只剩下一台仪器在其余各测站上流 动作业.3 台仪器每时段同步观测 1.5 小时以上,采样间隔 15 秒.由于观测时 间较短,接收机也已相对老化,故资料 质量较差,所以计算中不采用本年资 料.

1.4 2000年的观测

2000 年 6 月 27 日至 7 月 7 日 ,利用 5 套 ASHTECH Z-12(12 信道) 双频双 P



图 1 鲜水河断裂区大地形变测量 场地及 GPS 监测网(虚线框内)

码 GPS 接收机对本网进行了第三期复测. 观测时间均为 9 小时. 各个区域自身的三个点间的观测是同步的,并且同步时间为 9 小时,观测数据质量最好.

2 GPS 观测数据的解算

GPS 基线解算采用 TRIMBLE 仪器随机基线解算软件 GPSURVEY(2.35 版本). 平差采用武汉测绘科 技大学研制的 POWADJ 软件.

2.1 基线处理

1996 年和 2000 年的两期资料的解算采用了 IGS 精密星历 ;1991 年由于无精密星历 ,采用广播星历. 在进行基线解算时 ,要求 GPS 网中有一个精确的 WGS-84 或 ITRF 坐标框架中的坐标. 在鲜水河 GPS 监测

Fig. 1 Sketch map of the geodetic field and GPS network along Xianshuihe fault.

网中,两个远程跟踪点 DF01 和 XLT0 在 1995 年和 2000 年曾与国内的 IGS 网全球跟踪站武汉站和拉萨站 进行了一周多的全天联测,所以存在精确的 ITRF 参考框架中的绝对坐标和运动速率,故将其作为整个网 的起算点.并分别将其换算为每期 GPS 观测历元的瞬时坐标,同时还要保证与卫星星历的框架一致.

基线解算时分时段进行处理,在每个时段进行求 解时,主要采用如下模型和参数: 表1 鲜水河断裂 GPS 网三期观测点位

(1)对于基线长超过 10 km 的采用消除电离层影响的 L1、L2 线形组合相位观测值,不超过 10 km 的基 线用 L1 或 L2 的固定解;

(2) 对流层折射采用 Saastamoinen 模型用标准大 气参数进行改正;

(3)接收机天线相位中心改正采用 IGS 中心提供的参考值;

(4) 卫星截止高度角为 20 度, 历元间隔 30 s.

2.2 平差

选择不同的参照点(相对基准点),位移场就会有 所差异.根据本研究区特殊的地学条件,为充分显示区 域性的地壳运动特征,易于进行变形分析比较,在对三 期资料进行平差时,选用一致的约束条件,既以北东盘 离断裂带最远的点 DF10(位于甘青地块)作为固定 点,以其至同盘点 DF07 的方向作固定方向.即人为地 大致扣除了甘青地块的整体运动从而突出了川西地区

年份	1991 年	1996 年	2000年
测站标识名	DF01	DF01	DF01
	DF02	DF02	DF02
	DF03	DF03	DF03
	DF04	DF04	DF04
	DF05	DF05	DF05
			DF06
	DF07	DF07	DF07
	DF08	DF08	DF08
	DF10		DF10
		QJ01	QJ01
	QJ02	QJ02	QJ02
	QJ03	QJ03	QJ03
	QN01	QN01	QN01
	QN02	QN02	QN02
	QN03	QN03	QN03
	XLT1	XLT1	XLT1
	XLT2	XLT2	XLT2
	XLT3	XLT3	XLT3

注: DF 为道孚测点 QJ 为恰叫测点 QN 为乾宁测点; XLT 为虾拉沱测点.

的区域运动图象影响. 平差后 1991 年的长基线相对精度为 1×10^{-7} 2000 年的长基线相对精度为 1.3×10^{-8} .

2.3 结果

平差后所得形变结果见表 2 和图 2.

点名	北向分量 _{/mm}	东向分量 _{/mm}	北向分量 之中误差 _{/mm}	东向分量 之中误差 ^{/mm}	变形速率 mm∕a	方位角 /°	
DF01	-66.2	66.9	4.3	5.0	10.2	134.7	
DF02	-64.8	65.7	5.7	7.4	10.0	134.6	
DF03	-72.2	45.7	5.5	7.5	9.3	147.7	
DF04	530.1	-1134.9	6.1	8.0	136.3	295.0	
DF05	-49.2	9.3	6.5	8.6	5.4	169.3	
DF07	-18.2	-11.4	7.3	9.0	2.3	212.1	
DF08	- 19.9	-1.1	6.5	7.8	2.2	183.2	
QJ02	-65.2	29.5	5.5	7.0	7.8	155.7	
QJ03	-65.9	37.2	5.5	6.0	8.2	150.6	
QN01	7.6	114.5	9.3	12.3	12.5	86.2	
QN02	18.1	125.3	9.1	12.1	13.8	81.8	
QN03	-3.2	112.1	9.4	12.3	12.2	91.6	
XLT1	-12.0	48.8	3.4	3.7	5.5	103.8	
XLT2	-76.5	26.0	3.8	4.2	8.8	161.2	
XLT3	-73.2	27.6	4.1	5.2	8.5	159.3	

表 2 1991 年与 2000 年 GPS 测量所得地壳形变



表2列出了各 GPS 点的北向和东向位 移分量、谏率及中误差,图2所示为在地球参 考框架内,取DF10作为固定点,DF10至 DF07 为固定方向时本区 GPS 点 2000 年相对 干 1991 年的位移矢量图. 结果显示测网所控 制的鲜水河断裂带区的总体运动特征是: (1)由北西到南东位移量逐渐增大(2)方 向由在虾拉沱测区的南东逐渐转为在乾宁 (八美测区)附近的东西向,正好反映了该处 作为鲜水河断裂带南北两段分界的特殊的地 质构造条件(3)由道孚剖面点的位移可见 位于断裂带北东盘的点(在甘青地块上)距 断裂带越远位移量就小,而位于南西盘上的 点则恰好相反(4)近断裂带两侧的点位移 量相近 如果将两侧点位运动矢量沿断裂带 走向投影 其结果仅能反映很微弱的断裂带 的反扭运动 说明断裂带两盘的相对运动不 明显 而断裂带两侧块体的整体变形较显著 / 既各点的运动似乎不受其所跨的断裂带的约 束而表现出较高的一致性,运动量达8~10 mm/a 这与大区域的 GPS 测量^[4~6],特别是 中国地壳运动观测网络给出的该区现今地壳 运动结果一致[78]. 且在资料时段内(1991~ 2000年)沿断裂带无强震发生,由此也进一 步证明鲜水河断裂带北西段的优势运动形式



图 2 鲜水河断裂区 GPS 监测网测站位移速率 (相对于道孚 10 号点)

Fig. 2 Displacement velocity of GPS network stations on Xianshuihe fault region relative to DF10 station.

为粘滑错动,蠕滑运动甚微弱.而以上这些特征是常规跨断层短基线、短水准测量难以显示的^[9].而在种断裂带两盘相对水平运动不明显的背景下,鲜水河断裂带的现今垂直形变速率为0.3 mm/a,位居川滇地区各主要活动断裂带之首^[10].下面就这种区域地壳形变特征的动力学机制进行初步探讨.

岩石圈动力学研究和深部地球物理探测资料表明位于南北地震带中段的川青块体和川滇菱形块体受到了来自青藏高原的巨大挤压力^[11]. 我们的相对较小区域的 GPS 网观测所给出的地壳运动特征与上述认 识相符 ,反映了青藏高原隆升和物质侧移对本区地壳形变的控制作用.

一般认为印度板块以平均 50 mm/a 的速度北东向碰撞欧亚大陆是青藏高原隆升、高原物质侧移的主要原因,同时也是我国西部及邻区构造活动和地震活动的基本动力源^[7,12~14]. 马宗晋院士(1998)认为青 藏高原占主导的形变运动随时间发生变化^[15],而这种变化又是三维递进变形的必然结果. 根据不同变形 运动学的基本特征及其发生的主要时段,青藏高原的构造演化历史可以划分为α、β、γ和δ四个构造期, 它们在时间上彼此叠置,但运动性质则完全不同. 另外,1966~1992 年珠峰地区大地测量资料给出的区域 地壳运动特征表明这两大板块之间的作用力可能不是一个与时间无关的常量,而是一个变化的不稳定的 量^[16]. 马宗晋院士(2001)利用国家重大科学工程'中国地壳运动观测网络"1998~2000 年间81 个 GPS 测 站的观测资料认为印度半岛本身有可能分成了2 个或3 个北东向的断条,东、西侧两条各自推挤插入的方 式不同[7]. 张治洮 (1990)分析了印度板块 北移与强震发生的关系认为印度板块是 呈周期性的摇摆式北移[17].参考上述这些 研究成果和结论(如图3所示),我们认为 在这种不同方式的推进过程中,当印度板 块东尖端阿萨姆角推进时,川西地区整体 ∞∞ 受挤压 断裂带处于左旋压扭运动状态, 且块体的变形显著 区域地震危险性分析 应首先考虑沿断裂带的孕震部位,当这种 挤压力减弱时,在高原物质侧移的背景 下 可把川滇和川青地块视为一整体来考 虑其强震背景,即重点研究块体内的强 震. 近期发生于川西北和川青地块内的巴 塘、小金和雅江等强震就是明显的例证. 大地测量资料正好可以提供区分这种阶 段性的依据,鲜水河断裂带区常规大地测 量的结果是:自1973年炉霍7.9级大地震 以来 鲜水河断裂带测区以虾拉沱测点为 代表的断裂带北段的水平和垂直运动不



断衰减. 这期间也有活动增大的时段,如1980~1981年,但整体衰减的趋势未变.如1976~1980年间断裂带的水平运动速率均达到7mm多;1981~1988年间降至5mm左右;而1989年以来继续衰减到每年不到4mm. 其它场地如侏倭和沟普测点的垂直形变和水平形变大致都存在这样一种比例的衰减变化. 另外,自1991年以来川西测区大面积的垂直形变幅度也在减小),并出现了一定的逆继承运动态势^[18]. 这与我们本次的 GPS 结果相同,也就是说目前川西北地区处于整体运动占优势且整体变形较弱的阶段,而断裂带也处在相对运动较弱的时段.

从虾拉沱到乾宁各 GPS 测点位移矢量方向的有规律的变化看,在本测区似乎还存在一个整体的反时 针的旋转现象.陈智梁等(1999)根据川滇 GPS 网1991~1997 年的资料,提出了滇藏旋卷构造系和川西顺 时针旋卷构造系的概念^[4].而我们的鲜水河 GPS 网1991~2000 年的资料又显示了一个更小级别的逆时 针旋转运动.由此还可以引出的另一个认识:川滇地区在整体呈旋转运动的背景下,次一级地块也呈不同 方向的旋转运动.由此可见印度板块碰撞欧亚大陆和青藏高原物质侧移所产生的整体运动,在川西地区是 通过不同级别的活动地块以不同方向的旋转所反映出来的,并有可能主要以这种方式将印度板块的北向 推力传递到华南地区.

4 地震活动特征简析

地震活动和构造活动是密切相关的,实际上就是与时间相关的特殊构造活动.高精度大地测量,特别 是近年来快速发展起来的相对大区域的空对地观测技术是高精度量化这种运动的有效手段.根据区域构 造活动的时空分布特征来分析研究相应的区域地震活动特征,探索它们内在的联系应该是解决地震预测 的有效途径之一.国家重点基础研究项目《大陆强震机理与预测》提出了活动地块动力学假说:明确指出 板内强震的孕育、发生与大陆不同级别的活动地块的运动、深浅耦合关系和相互作用密切相关.就本研究 区而言,地壳形变测量资料和鲜水河 GPS 网给出的断裂主断面近侧的地形变结果表明:鲜水河断裂 1973 年前活动强烈^[19],之后发生了 1973 年炉霍 7.9 级地震;1980~1981 年活动再度加剧,对应了道孚 6.9 级 地震.1984~1988 年活动减弱,之后在外围发生了巴塘 6.6 级地震和小金 6.5 级地震;1991 年后的弱活动 对应了近期的雅江 6.1 级地震. 由此可见本区地壳运动与强震活动特点完全符合上述理论. 因此我们认为 在断裂活动较弱的时段,可将川滇、川青地块视为一个整体,重点研究活动地块的运动与变形及其地震危 险性. 而当断层的相对运动较强时,再以活动断裂为边界划分活动地块近而研究沿断裂带强震孕育、发生 的危险性.

另外 /本项研究还显示出了近年来快速发展起来的高精度短边 GPS 测量在约束活动断裂带近侧一定 区域内地壳运动与变形的优越性和广泛的应用前景.

本项研究在立项和执行过程中得到了张培震研究员的热情支持和悉心指导,作者诚致谢忱. 徐杰研究员和周本刚副研究员阅读了本文初稿并提出了宝贵的建议,在此一并表示感谢!

[参考文献]

- [1] 闻学泽 C R Allen 罗灼礼 ,等. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义[J]. 地震学报 ,1989 ,11(4) 362—371.
- [2] 唐荣昌 韩渭宾.四川活动断裂与地震 M].北京 地震出版社,1993.241-242.
- [3] 张存德 向家翠.从形变资料看鲜水河断裂带的活动特征 A].见 :中国活动断裂[C].北京 地震出版社.1982.262—266.
- [5] Zheng kang Shen, Cheng kun Zhao, An Yin, et al. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurements[J]. Jour. Geophys. Res., 2000 105(B3) 5721—5734.
- [6] 游新兆 杜瑞林,王琪, 等. 中国大陆地壳现今运动的 GPS 测量结果与初步分析 J]. 地壳形变与地震 2001 21(3):1-8.
- [7] 马宗晋 陈鑫连 叶叔华 ,等. 中国大陆区现今地壳运动的 GPS 研究 J]. 科学通报 2001 46(13):1118—1120.
- [8] 王琪 涨培震 /牛之俊 /等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形 J]. 中国科学(D辑) 2001 31(7) 529—536.
- [9] 李铁明,吕弋培,廖华.鲜水河断裂带的形变特征及1998 年度震情分析[A].地震危险性预测研究(1998 年度)[C].北京 地震出版 社,1997.92—98.
- [10] 车兆宏 涨艳梅. 南北地震带中南段断层现今活动[J]. 地震 2001 21(3) 31-37.
- [11] 张先,赵丽,刘敏,等.南北地震带中段地震活动的板块动力学研究[J].华北地震科学,1996,14(4):11—18.
- [12] 马杏垣主编.中国岩石圈动力学地图集[M].北京:中国地图出版社,1989.49—51.
- [13] 丁国瑜主编. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京 地震出版社,1991.
- [14] Molnar P., Tapponnier P.. Cenozoic tectonic of Asia effects of a continental collision[J]. Science, 1975, 189:419-425.
- [15] 马宗晋 涨家声 汪一鹏. 青藏高原三维变形运动学的时段划分和新构造分区[J]. 地质学报, 1998, 72(3) 211—227.
- [16] 陈俊勇, 张骥, 薛璋, 等. 珠穆朗玛峰地区的地壳运动及有关问题的探讨[J]. 地球物理学报, 1996 39(1) 58—67.
- [17] 张治洮. 印度板块摇摆式北移与强震的关系[J]. 西北地震学报, 1990, 12(4) 80-83.
- [18] 江在森,丁平,王双绪.中国西部大地变形监测与地震预测[M].北京,地震出版社,2001.
- [19] 吕弋培 廖华 彭长虹,等.四川及邻区地壳垂直形变特征与地震的关系[J].四川地震,1996(4):109---116.
- [20] 孙少安,贾民育,顶爱民.鲜水河断裂的重力场变化特征[J].地壳形变与地震 2001 21(1).72—78.
- [21] 周荣军,何玉林,黄祖智,等.鲜水河断裂带乾宁--康定段的滑动速率与强震复发间隔[J].地震学报 2001 23(3) 250--261.

CURRENT CRUSTAL DEFORMATION IN NORTH SECTION OF XIANSHUIHE FAULT CONSTRAINED BY GLOBAL POSITIONING SYSTEM

LI Tie-ming¹, DENG Zhi-hui¹, LUI Yi-pei², LIU Ben-pei³

(1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

2. Seismological Bureau of Sichuan Province Sichuan Chengdu 610041 China;

3. Institute of Surveying and Mapping of Wuhan University Hubei Wuhan 430070 China)

Abstract Global Positioning System (GPS) network on north section of Xianshuihe fault is arrayed in 1991 and measured 3 times in 1991, 1996 and 2000. The result shows that :(1) The displacement velocity increase regularly from Xialatuo station in rate of 8.5 ± 0.8 mm/yr with SE direction to Qianning station in rate of 13.8 ± 1 . 7 mm/yr with EW direction along the fault.(2) On the Daofu measure profile which cross the fault the velocity rise as stations are far from the fault on the SW wall of fault.(3) The relative movement of the stations on two walls of the fault is little so we infer that at present the slip rate of the Xianshuihe fault is not obvious that is in accordance with the conventional geodetic data along the fault. As the conclusion in the period of minor activity of Xianshuihe fault the Chuandian and Chuanqing plates should be thought as a whole when studing its seismic hazard in other time we should put our studying focal on the activity of the fault and the relationship with the seismic hazard.

Key words Xianshuihe Fault ; GPS survey ; Crustal deformation

STRONG MOTION RECORDS AND PRELIMINARY ANALYSIS FOR MINLE – SHANDAN $M_s6.1$ EARTHQUAKE ON OCT. 25 2003 , GANSU PROVINCE

MIN Xiang-yi , YAO Kai , HE Xin-she

(Lanzhou Institute of Seismology ,CSB ,Gansu Lanzhou 730000 , China)

Abstract :Minle – Shandan M_s 6.1 earthquake occurred on Oct. 25 2003. in west of Gansu province. Just before the earthquake 4 digital mobile strong motion instruments were erected in Hexi region, near the epicenter ,by Lanzhou Institute of Seismology, according to the definite prediction opinion of the Institute. One instrument of them in Minle mobile station obtained the near-field strong motion seismic record of main shock. The distance to epicenter is 12.6 km. The maximum acceleration on direct EW is 331 cm/s² ;on NS is 332 cm/s² and on UD is 209 cm/s². Furthermore some immobile strong motion stations in Hexi region (Shandan Sunan and Wuwei) also obtained this event. In the paper the observed near-field frequency spectrum of main shock and the acceleration attenuation equation for Hexi region, Gansu province, are discussed based on the data of M_s 6.1 main shock and M_s 5.8 aftershock.

Key words :Minle - Shandan earthquake ; Near-field strong motion ; Digital data ; Attenuation