

青藏高原东部地壳运动的GPS测量^①

陈智梁^① 沈 凤^{①②} 刘宇平^① 赵济湘^① 张选阳^① 唐文清^①

Robert W. King^② B. Clark Burchfiel^② Leigh H. Royden^②

在青藏高原晚新生代隆升过程中形成了一系列走滑断裂,这些断裂是否驱使地壳块体向东作长距离的滑移或逃逸,并成为东亚大陆及相邻海域地质构造的主要动力因素,是当前地学界关注的重大科学命题。对此,出现了众说纷纭的解释的假说。例如,Tapponnier 等人的向东逃逸模式(1982),England 等人的右旋剪切旋转模式(1990)。急需足够的证据,尤其是定量化的数据来检验和约束这些认识,真实地理解青藏高原地球动力学过程和机制。这样,青藏高原东部地壳运动问题便凸现出来,成为青藏地质乃至大陆地质的关键和热点。

当代空间大地测量技术所能达到的时空分辨率和准确度,使它成为实时测定现今地球动力学过程所输出的力学信号,监测地球动力学现象的有力手段。其中,全球定位系统(简称GPS)具有全天候、高精度、低投入和高效率等优点,以及全球尺度测量的性能,发展迅速,或为地学界乐于用来监测板块运动和地壳形变的理想工具。

用于监测青藏高原东部地壳运动的GPS测网由龙门山(包括成都基准站CHDU)和云南网组成,分别跨越了川青地块、川滇地块及其相邻的扬子地块地区。本文将介绍“八五”期间,龙门山网1991~1995年4次测量和云南网1993~1995两次测量的研究成果。

测量按载波相位静态定位方案实施。数据采集使用多台双频接收机,蠕动式布网展开。数

据分析分两步进行。第一步,用GAMIT软件分析各时段载波相位观测量,求解相位模糊度等。第二步,用GLOBK软件综合处理单时段解,计算测站的平均坐标、测站速度和多时段的轨道参数。同时,有效地把区域网和全球网紧密地联结起来。

速度场及其精度

选定位于扬子地块的成都基准站(CHDU)为参照点,GPS测算各测站相对成都的速度矢量如表1。成都基准站到各测站的基线长度变化为42~828km,云南网测站的基线一般比龙门山长。龙门山网测站的不定度总体低于2mm/年,云南网测站低于4mm/年。基线边长相对精度为 10^{-8} 级,北向分量的精度可达 10^{-9} 级,垂向分量的精度可降低到 10^{-7} 级。随着今后多次复测和适当延长观测时段,以及全球框架网的改善,精度还会有所提高。

为了反映测站计算的分散度以及可能存在的系统误差,在速度场图(图1)中,把速度的不定度扩大了一倍,并用椭圆表示在二维方向上 1σ 的置信度范围。

首先,川滇地块及其相邻地区大多存在 $\geq 10\text{mm/年}$ 的运动,这与鲜水河断裂以东的川青地块及其相邻地区微弱的运动呈显著的对照。表明地壳形变受制于地壳块段的分划。

分段性还表现在地块内部。川滇地块北部地壳运动速度最高,一般在 14mm/年 以上,方向稳定为南东。南部的速度大幅度减小,为 $8\sim$

① 地矿部“八五”深部地质研究项目(85—6—214)和中美合作研究项目成果

0.4mm/年,且方向变化。沿东缘鲜水河—小江断裂的运动变化很有规律,即方向由南南东,变为南,甚至南西。而且在西昌段有强烈的会聚和逆时针走滑(8~10mm/年),向南则急剧地减弱。沿西缘通甸—乔后断裂的运动则主要是平行的走滑运动,垂直位移分量微不足道。但沿它南延的红河断裂既有幅度不大的顺时针走滑,又在楚雄段表现出较为强烈的会聚。

川青地块的速度场以速度小、方向分散为特征,并启示北部向东和向南会聚,南部向西伸展,以中南部的伸展最为明显。还可能存在着自北而南,由向东、向南的运动,渐变为南西,再向西的跨越龙门山断裂的涡旋趋势。

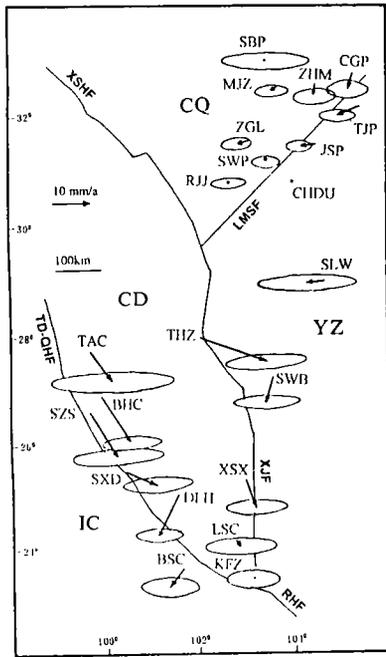


图 1 根据 GPS(91—95 年)观测数据所解算的

各测站相对于成都站(CHDU)的速度

- LMSF: 龙门山断裂
- CQ: 川青地块
- XSHF: 鲜水河断裂
- CD: 川滇地块
- XJF: 小江断裂
- IC: 印支地块
- TD—QHF: 通甸—乔后断裂
- RHF: 红河断裂
- YZ: 扬子地块

速度梯度张量

假定在所定义的单元内应变场是均匀的,对测站速度及其协变量进行最小二乘法反演,

可计算速度梯度张量(Feigl 等,1993)。速度梯度张量的对称部分为应变速率张量,非对称部分给出了平均旋转速率(平均涡度)。表 2 列出云南网每一子网的速度梯度张量观测值,图 2 和图 3 分别表示水平应变速率张量的主轴和围绕垂直轴的平均旋转速率。

整个龙门山山的平均应变速率很小,为 -1×10^{-8} /年。鲜水河—小江断裂以东的扬子地块地区(SWS—SWB—SLW—CHDU—RJJ 子网)应变速率也小,以 NE—SW 方向的弱引张为特征,基本不发生旋转。但是,当和断裂西盘联系起来时,如与 THZ 联算的子网,即产生强烈的近东西挤压,并发生程度不等的逆时针旋转。

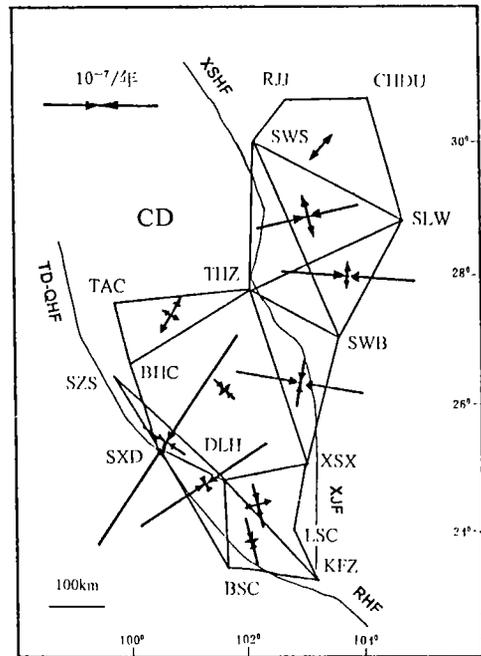


图 2 GPS 云南网测量解算所得的水平应变速率张量的主轴分布(代号同前)

川滇地块的应变速率有明显的分段变化。北部为 NE—SW 向的引张区,中部为 NW—SE 向弱挤压区,南部为近南北向的中等挤压区。北部和中部表现不同程度的顺时针旋转,南部则为逆时针旋转。非常有意义的是,沿着边界断裂的子网应变速率比地块内部高得多,且主

压应变轴的方向大多垂直断裂的走向,和地块的应变主轴方向相去甚远。

地质意义

川滇地块和川青地块,虽作为青藏高原东部相邻的构造单元,但具有明显差异的地壳速度场和应变场,反映它们不同的动力学条件和过程。显然,川青地块和四川盆地之间是相对稳定的。虽然可能也有微弱的顺时针转动趋势,但不存在明显的向东运动和会聚,反而在南部出现向西的伸展活动。川滇地块是地壳运动活跃的单元,高速度和强应变集中在边缘,表明上部地壳运动受边界断裂的控制,变形以断裂的滑动为主要调节方式。对川滇地块而言,即使在西昌段出现向东的挤压和会聚,但不存在明显的向东滑移和逃逸。需要提及的是,由于青藏高原东缘没有明显的东移和会聚,如果高原地壳物质大规模地向东挤出,那么必然会连带它东侧的四川盆地和云贵高原等一起向东运动。然而,当把欧洲作为欧亚板块的稳定部分固定不动,用我们的测站和欧洲 GPS 站进行联算后,也得

不出和上海向东运动(Molnar 等,1996)相协调的运动矢量,而指示测站作南南东方向的运动。

引人注目的是川滇地块中速度场和应变场的变化,尤其是在它的中南部出现西南方向的速度矢量,并且越过红河断裂进入印支地块。这种与上地壳析离的运动,可能反映了地壳深部物质在作大尺度的顺时针流变,可以认为这种运动与东喜马拉雅构造结向北楔入活动有关。所以,青藏高原东部地壳运动是一种复杂系统。

应该提出,GPS 观测成果和地震信息有很好的对应性。已知的主要地震 P 波初动解的主轴方位(唐荣昌等,1993),大多和 GPS 测算的应变主轴一致,因而可以用测算的速度场和应变场来推论发震条件。例如 1996 年丽江地震(M=7.0,5.7)和宜宾地震(M=5.4)在监测资料中都有征候,为地震预报提供了依据。1976 年松潘—平武地震(M=7.2,6.7,7.2):第一次强震主压应力方向为 63°,顺扭;后两次强震主压应力方向为 110°和 95°,反扭(唐荣昌等,1993)。由于第一次强震和监测所得的速度场一致,可以认为后两次强震是弹性回跳的表现。

古地磁和地质研究可以得到较长时间尺度的地壳运动信息。对四川雅安地区第三系古地磁测定表明自早第三纪中晚期以来地块逆时针旋转了约 7°(庄忠海等,1988),对云南元谋下更新统的测定推论早更新世以来顺时针旋转了约 10°(据翟永建等,1989)。这些认识也和 GPS 测算的地块旋转趋势相一致。地质调查指出小东江断裂的总滑移量为 60km(王二七等,1993),由测算的断裂运动速率可以得出推论小江断裂已持续活动约 4 百万年。这与断裂带内拉分盆地的充填历史是协调的,反证由 GPS 测算所得的地壳运动速度在相当长时期内是有代表性的。所以,在同一的地质构造框架的时期内,不同时间尺度的地壳运动,由于源于相同或相似的地球动力学机制,它们之间有内在的联系,表现出一致性。因此,由 GPS 得出的地壳运动认识,不但可以很好应用于现代地质作用研

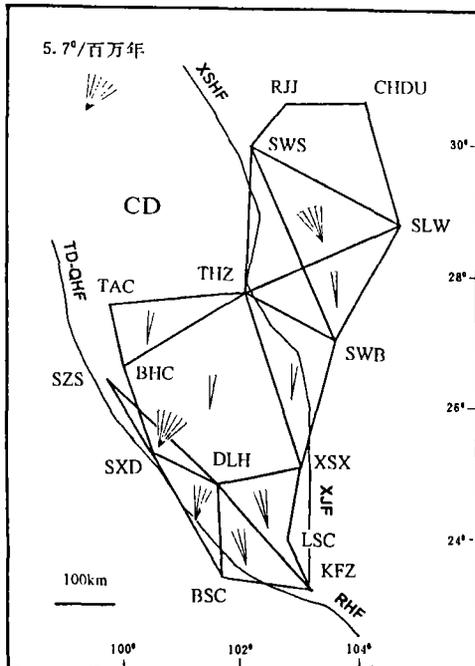


图 3 GPS 云南网测量解算所得的平均旋转速率 <math>< 1.1^\circ/</math>百万年的子网有所夸大表示(代号同前)

究中,而且有可能推广到那些有同一地质构造框架时期的构造—成矿作用研究中去。

致谢:研究工作得到肖序常院士、刘宝珺院士、李廷栋院士、陈俊勇院士和徐宝文高级工程师的指导。他们和陈述彭院士、丁国钰院士、马

宗晋院士、项永仁高级工程师等专家参加对研究报告的评审和建议。陈毓川、张良弼、王泽九、冯昭贤、高平诸领导对项目十分关心和支持。李毓麟高级工程师和成都地矿所、成都理工学院、测绘研究所的科技人员参加了部分工作。

表 1 青藏高原东部及相邻地区各 GPS 测站相对于成都的地壳运动速度水平分量

地质构造位置	测站	坐标		速度(mm/年)			
		纬度	经度	北向分量	东向分量	东向分量	东向分量
川青地块东缘	SBP*	32.88	103.48	-0.07±0.87	0.34±4.38		
	MJZ*	32.40	103.73	-1.04±0.63	-1.6±1.6		
	ZGJ*	31.46	103.17	-0.85±0.65	-3.91±1.53		
	RJJ*	30.70	102.74	-0.17±0.52	-0.63±1.73		
龙门山带	ZHM*	32.47	104.50	-4.29±0.86	-0.24±2.15		
	CGP*	32.61	105.31	-4.78±0.87	-1.29±2.15		
	SWP*	31.41	103.49	-1.32±0.62	0.15±1.39		
川滇地块西缘	TAC [△]	27.68	99.73	-9.19±0.97	6.70±6.46		
	BHC [△]	26.78	100.00	-13.20±0.66	8.66±3.05		
	SZS [△]	26.53	99.71	-13.09±0.87	8.28±4.79		
	SXD [△]	25.43	100.46	-4.39±0.78	9.53±3.35		
	DLH [△]	24.92	101.58	-11.27±0.72	-5.86±2.41		
	LSC [△]	24.07	102.76	-2.26±0.89	1.80±3.58		
川滇地块东缘	THZ [△]	27.87	102.10	-7.46±0.73	19.24±4.15		
	XSX [△]	25.17	103.02	-7.83±0.72	2.91±3.10		
	KFZ [△]	23.29	103.15	-0.16±0.92	-0.37±2.72		
扬子地块西缘	TJP*	32.02	105.46	-2.49±0.61	-6.34±1.83		
	JSP*	31.37	104.56	-0.71±0.57	-4.81±1.30		
	SLW [△]	28.86	104.66	0.66±0.73	-4.49±5.02		
	SWB [△]	27.11	103.57	-7.13±0.66	-1.57±3.51		
印支地块北缘	BSC [△]	32.52	101.69	-5.15±0.98	-4.15±2.98		

*—龙门山网测站 △—云南网测站

表 2 川滇地块及邻区的速度梯度张量值

计算子网	压性轴特征值 (10ppb/年)		张性轴特征值 (10ppb/年)		旋转速率 (度/百万年)		压性轴方位角 (度)	
	测算值	不定度	测算值	不定度	测算值	不定度	测算值	不定度
	SWS-SLW-THZ	-9.04	6.28	3.45	2.69	-3.94	5.98	77.94
SLW-THZ-SWB	-11.5	6.61	1.98	1.61	-0.83	4.45	94.24	18.38
SWS-SWB-SLW-CHDU-RJJ	0.58	2.88	2.84	4.32	0	1.23	-37.38	83.49
THZ-SWB-XSX	-11.0	9.08	-4.39	0.87	0.16	2.22	99.22	12.13
TAC-THZ-BHC	1.87	1.34	3.91	5.28	0.40	7.83	119.29	83.16
TAC-BHC-SXD-DLH-THZ-XSX	-2.05	1.54	1.48	2.98	1.13	1.65	-40.54	17.62
DLH-XSX-LSC-KFZ-BSC	-4.07	1.37	2.94	4.44	-1.80	2.05	-15.29	13.77
BSC-KFZ-DLH	-4.02	1.68	1.06	6.80	-2.16	2.98	-11.98	23.23
SZS-SXD-DLH	-22.7	19.08	-3.99	4.04	4.94	1.10	36.91	36.81
BSC-SXD-DLH	-12.9	9.48	-1.43	2.79	3.26	3.00	58.19	31.43

应变主轴特征值:(-)号为挤压,(+)号为引张。旋转速率:(-)号为逆时针旋转,(+)号为顺时针旋转。

① 作者为成都地质矿产研究所。 ② 作者为美国麻省理工学院。