

精密全球卫星定位系统多期复测研究青藏高原 现今地壳运动与应变

刘经南^① 许才军^② 宋成骅^① 施闯^① 姜卫平^① 董立祥^②

(武汉测绘科技大学 ①GPS 工程研究中心; ②地学测量工程学院, 武汉 430079. Email: jnliu@wtusm.edu.cn)

摘要 利用 1993、1995 和 1997 年 3 期全球卫星定位系统(GPS)观测资料测定了青藏高原 GPS 监测站的三维位移速率, 并由此计算分析了青藏高原现今地壳运动与应变. GPS 多期精密复测结果显示, 青藏高原现今地壳运动仍以南北向挤压、东西向拉张、垂直方向隆升为主. 喜马拉雅块体的相对汇聚速率大约为 (19.5 ± 1.7) mm/a, 拉张速率大约为 (5.5 ± 6.0) mm/a 左右, 隆升速率大约为 (7.6 ± 5.2) mm/a. 西藏块体相对于格尔木南北向缩短率大约为 (9.3 ± 4.6) mm/a, 东西向拉张速率大约为 (8.7 ± 6.4) mm/a, 中部拉张速率最大约为 (15.6 ± 6.30) mm/a, 反映了高原侧向挤出运动. 喜马拉雅块体以压应变为主, 西藏块体中部以张应变为主, 最大张应变率和最大压应变率分别为 0.131×10^{-6} 和 $-0.189 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$.

关键词 GPS 测量 青藏高原 地壳运动 应变分析

青藏高原的地壳水平运动问题, 争论的焦点集中在高原主体侧向挤出量的估计上, 一种观点认为: 构造变形主要集中在少数几条走滑断层上, 而由其所围限的块体的侧向运动是调节构造变形的机制, 其侧向挤出量可高达汇聚总量的 50%^[1-6]; 另一种观点认为: 印度板块和亚洲大陆的汇聚所引起的构造变形主要是通过逆断层作用和地壳增厚来调节的. 因此, 高原物质的侧向挤出不是主要的, 只达到汇聚总量的 20% 左右^[7-13].

由于地质、地震资料的不确定性, 使得仅利用它们来描述青藏高原现代构造变形特征具有一定的缺陷. 大地测量是观测地表变形的最精确的手段, 青藏高原的精密重复水准测量和重力测量表明喜马拉雅山脉仍在不断抬升, 速率大约为 10 mm/a 左右^[14-16]; 重复 GPS 测量的基线变化率总体情况是南北方向大于东西方向, 南北方向缩短、东西方向拉张^[17, 18], 利用个别国际 GPS 地球动力学服务局(IGS)跟踪站的连续 GPS 测量结果表明喜马拉雅块体的汇聚速率为 20.0 mm/a 左右^[19-22], 本文作者曾利用 1993 和 1995 年两期 GPS 资料确定青藏高原块体二维相对运动情况^[23], 张强等人^[24]利用中国地壳运动 GPS 监测网站和中国邻近地区 GPS 站的水平速度场研究了中国地壳各块体运动模型. 本文利用多期精密 GPS 观测资料改善前人研究的结果, 具体描述喜马拉雅块体与西藏块体的三维变形特征, 给出其应变图像, 进一步探讨青藏高原现今地壳运动.

1 GPS 观测与处理

青藏高原 GPS 形变监测网共有 14 个点组成(1997 年增加了亚东一个点), 范围大约在北纬 28°~36°, 东经 85°~94° 以内, 呈狭长形, 北起格尔木, 南至聂拉木, 贯穿了整个西藏块体, 全网长约 1 470 km, 宽约 60 km, 采用 TURBO ROGUE SNR 8000GPS 接收机, 分别在 1993 年 7 月 18 日~8 月 17 日, 1995 年 6 月 5 日~7 月 5 日和 1997 年 6 月 5 日~6 月 25 日观测了 3 期. 数据利用 GAMIT 软件(版本为 9.71)进行基线解算, 解算时以拉萨站作为起算点, 并固定其历元坐标和位移速率, 其数值采用 IGS 提供的结果. 为了削弱星历对基线解算的影响, 解算 1993 年的数据

采用 CODE 星历, 星历精度为 1 m 左右, 解算 1995 和 1997 年的数据都采用 IGS 星历(1995 年星历框架为 ITRF 93, 星历精度为 15 cm 左右, 1997 年星历框架为 ITRF 94, 星历精度优于 10 cm). 为进一步削弱和消除各期会战网结果之间的系统性误差, 我们采用武汉测绘科技大学研制的 PowerADJ 软件将各期会战网的基线解在统一的 ITRF 97 坐标框架基准下进行整体平差和块体运动学分析, 所得结果列于表 1 和图 1, 2.

表 1 青藏高原 GPS 站运动速率的监测结果

测站	经度/(°)	纬度/(°)	$V_{ew}/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$			$V_{ns}/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$			$V_{up}/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
			GPS	NNRA ^{a)}	GPS-NNRA	GPS	NNRA ^{a)}	GPS-NNRA	
格尔木	94.9	36.4	40.7±8.4	24.9	15.8	4.7±4.5	-7.6	12.3	1.2±4.9
不冻泉	93.9	35.5	45.8±8.2	24.9	20.9	2.6±4.4	-7.4	10.0	-0.8±5.1
二道沟	92.8	34.6	48.0±7.6	25.0	23.0	4.1±4.1	-7.1	11.2	4.4±4.7
雁石坪	92.1	33.7	51.5±7.5	25.0	26.5	5.6±4.0	-6.9	12.5	1.1±4.4
温泉	91.9	33.1	52.7±6.4	25.0	27.7	9.5±3.5	-6.9	16.4	-10.4±7.9
安多	91.7	32.3	48.7±5.2	25.0	23.7	6.7±2.7	-6.8	13.5	6.0±3.1
那曲	92.0	31.5	50.7±4.7	25.0	25.7	8.2±2.4	-6.9	15.1	3.8±2.8
拉萨	91.1	29.7	46.4±1.2	24.9	21.5	14.0±1.0	-6.7	20.7	2.5±2.0
甘孜	89.6	28.9	44.1±4.5	25.0	19.1	20.4±2.5	-6.3	26.7	8.0±2.9
拉孜	87.6	29.1	43.4±5.3	25.1	18.3	22.6±2.9	-5.7	28.3	7.5±3.5
聂拉木	86.0	28.3	42.0±5.4	25.1	16.9	24.7±3.1	-5.3	30.0	9.1±5.1
萨嘎	85.2	29.4	42.7±5.8	25.2	17.5	22.1±3.3	-5.1	27.4	7.0±4.4
日喀则	88.9	29.2	48.5±4.9	25.0	23.5	20.7±2.7	-6.1	26.8	6.6±6.6
索县	93.8	31.9	56.3±6.3	24.9	31.4	4.1±3.6	-7.4	11.5	6.6±7.9

a) NNR-NUVELIA 模型^[25]

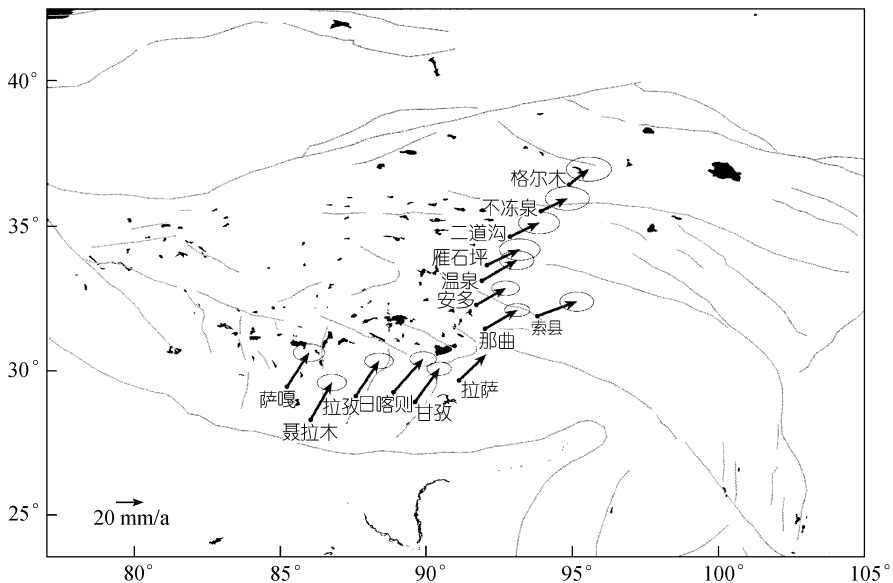


图 1 1993, 1995 和 1997 年 3 期 GPS 观测确定的 GPS 监测点相对于欧亚板块水平运动速度
图中误差椭圆代表 95% 置信区域, 折线为主要活动断层

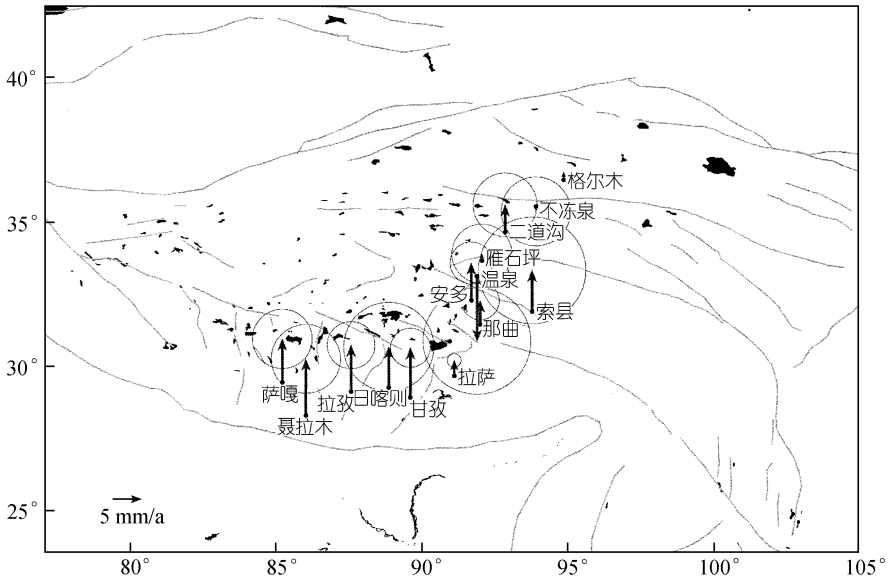


图2 1993, 1995 和 1997 年 3 期 GPS 观测确定的垂直运动速度(相对于 ITRF 97 框架)
图中误差椭圆代表 95% 置信区域, 折线为主要活动断层

为进一步研究青藏地区地壳运动的动力学机制, 利用 GPS 监测网所得的水平位移场在椭球面上进行了应变、应变率计算, 计算公式^[26]如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_E \\ \Delta U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_E}{\partial E} & \frac{\partial U_E}{\partial N} \\ \frac{\partial U_N}{\partial E} & \frac{\partial U_N}{\partial N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \end{bmatrix} = \varepsilon \Delta P + dR \Delta P,$$

这里 $\Delta P = [\Delta E, \Delta N]^T$, ΔE 为两点的经度差, ΔN 为两点的纬度差, ε 与 dR 就是椭球面上的应变张量和旋转张量. 将全网从南到北、从西到东依次分成 A, B, C, D 和 E 5 个区, 对相邻区有重叠部分的应变, 又用全网 14 个点作为一个整体计算了一套应变参数.

2 计算结果分析与讨论

表 1 给出了 GPS 速度分量、全球无旋转板块运动模型预测值及相对于欧亚板块水平运动速度分量. 拉萨站相对于欧亚板块水平运动速度为 (29.8 ± 1.5) mm/a, $N46.1^\circ \pm 1.3^\circ E$, 与文献[20]的结果 (29.4 ± 1.2) mm/a, $N43.8^\circ \pm 2.4^\circ E$ 及文献[21]的结果 (30 ± 3) mm/a, $N40^\circ \pm 5^\circ E$ 一致. 若以 Bangalore (II SC) IGS 跟踪站的速度代表印度板块向欧亚板块俯冲的速度, 由 NUVEL-1A 模型确定两板块相对运动方向, 则由拉萨与 II SC 的速度差可得喜马拉雅块体的相对汇聚速率为 (19.5 ± 1.7) mm/a. 而拉萨与格尔木的纬向速度差显示西藏块体南北向年缩短率为 (9.3 ± 4.6) mm/a. 这些结果反映了青藏高原现今南北向缩短速率, 与其他 GPS 资料及利用地质、地震资料获得结果的比较见表 2.

青藏高原现今东西向拉张主要体现在西藏块体中部. 索县相对于格尔木东西向拉张速率达 (15.6 ± 6.3) mm/a, 西藏块体上的二道沟、温泉、雁石坪、安多、那曲、索县和拉萨 7 个点

相对于格尔木的平均拉张速率为 (8.7 ± 6.4) mm/a. 喜马拉雅块体上的甘孜、拉孜、聂拉木和日喀则拉张速率大约为 (4.4 ± 5.6) ~ (6.5 ± 7.0) mm/a 左右, 该结果与 Baranowski 等人利用地震资料估计的结果 5~10 mm/a 以及 Armijo 等人^[4]利用卫星照片映像资料估计的结果 (10 ± 5) mm/a 相符合.

表 2 青藏高原南北向缩短速率(mm/a)比较结果

序号	喜马拉雅块体	西藏块体	资料来源	备注
1	19.5 ± 1.7	9.3 ± 4.6	本文	GPS
2		9 ± 1	文献[22]	GPS
3	22.0 ± 2.0		文献[20]	GPS
4	18 ± 2		文献[19, 21]	GPS
5	18 ± 7		文献[27~29]	地质、地震资料

除个别点外, GPS 监测点径向的速率都显示青藏高原仍处于快速隆升中. 若以西藏块体上有 3 期观测的二道沟、雁石坪、安多、那曲和拉萨 5 个点的平均隆升速率代表西藏块体隆升速率, 则西藏块体隆升速率大约为 (3.6 ± 4.0) mm/a, 藏南隆升速率为 (6.6 ± 6.6) ~ (9.1 ± 5.1) mm/a. 这与张青松等人^[14]利用国家一等水准资料计算所得西藏块体隆升速率为 5.8 mm/a 以及 Jackson 等人^[15]利用水准资料计算所得喜马拉雅块体相对西藏块体隆升速率 (7.5 ± 5.6) mm/a 基本一致. 温泉点下降速率 (10.4 ± 7.9) mm/a, 似乎难以解释, 最大可能是温泉点位不稳定, 也有可能是地下水抽取的原因而引起地面沉降; 若与其他几个隆升速率不明显的点一起考虑, 也可能表示西藏块体中北部存在逆断运动的断层, 这些还需进一步研究及其后续 GPS 观测来确定.

若印度板块以 50 mm/a 的速度向北运动, 则大约 40%由喜马拉雅块体吸收, 大约 20%~30%由西藏块体吸收, 且西藏块体东西向拉张速率与南北向缩短速率比基本上为 1 : 1; 而喜马拉雅块体东西向拉张速率与垂直方向隆升速率比大约为 1 : 1.4, 西藏块体东西向拉张速率与垂直方向隆升速率比大约为 2.5 : 1.

由表 3 和图 3 可以看出, GPS 测量结果反映青藏高原的地壳应变仍以南北向挤压、东西向拉张为主. 喜马拉雅块体以压应变为主, 西藏块体中部以张应变为主, 青藏高原最大张应变率和最大压应变率分别为 0.131×10^{-6} 和 $-0.189 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$. 若以 14 个监测点作为一整体, 则反映的区域应变状态为北北东向(N9°E)挤压, 北西西向拉张, 最大剪应变率为 $0.027 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 面膨胀率为 $-0.012 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$.

表 3 青藏高原 GPS 观测值确定的应变率参数

区域	最大主应变率/a ⁻¹	最小主应变率/a ⁻¹	最大主应变方位角/(°)	最大剪应变率/a ⁻¹	面膨胀率/a ⁻¹
A	0.051×10^{-6}	-0.189×10^{-6}	92	0.243×10^{-6}	-0.141×10^{-6}
B	0.071×10^{-6}	-0.121×10^{-6}	90	0.191×10^{-6}	-0.050×10^{-6}
C	0.131×10^{-6}	-0.076×10^{-6}	82	0.207×10^{-6}	0.056×10^{-6}
D	0.096×10^{-6}	-0.117×10^{-6}	96	0.212×10^{-6}	-0.021×10^{-6}
E	0.024×10^{-6}	-0.063×10^{-6}	92	0.087×10^{-6}	-0.039×10^{-6}
整体	0.015×10^{-6}	-0.040×10^{-6}	-81	0.027×10^{-6}	-0.012×10^{-6}

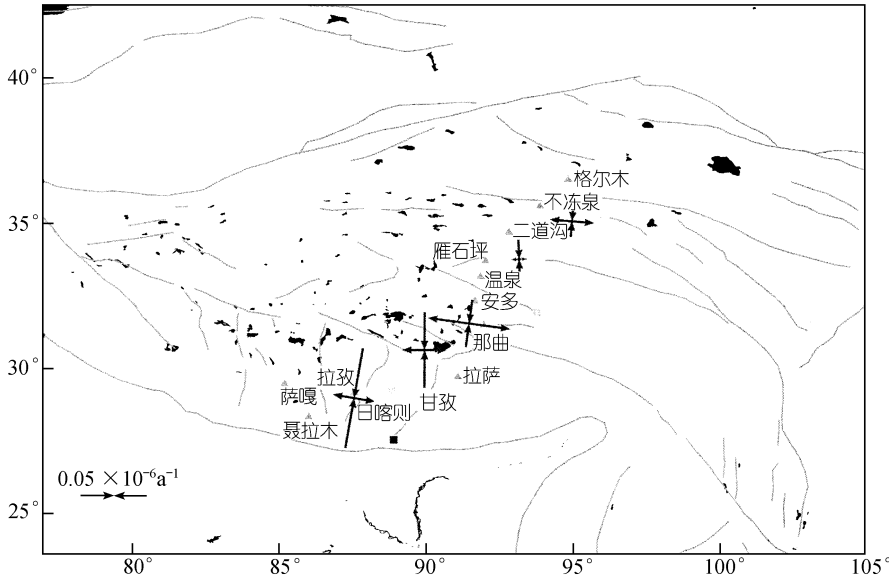


图3 1993, 1995 和 1997 年 3 期 GPS 观测确定的地壳应变率场
图中相对箭头表示为压缩应变, 相离箭头表示为拉张应变. 折线为主要活动断层

3 结论

GPS 多期精密复测结果显示, 青藏高原现今地壳运动仍以南北向挤压、东西向拉张、垂直方向隆升为主. 喜马拉雅块体的相对汇聚速率为 (19.5 ± 1.7) mm/a, 拉张速率为 (5.5 ± 6.0) mm/a, 隆升速率为 (7.6 ± 5.2) mm/a. 西藏块体相对于格尔木南北向缩短速率大约为 (9.3 ± 4.6) mm/a, 东西向拉张速率大约为 (8.7 ± 6.4) mm/a, 中部拉张速率最大约为 (15.6 ± 6.3) mm/a, 反映了高原侧向挤出运动. 印度板块向北运动量, 大约 40%由喜马拉雅块体吸收, 20%~30%由西藏块体吸收. 喜马拉雅块体以压应变为主, 西藏块体中部以张应变为主, 青藏高原最大张应变率和最大压应变率分别为 0.131×10^{-6} 和 $-0.189 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$. 14 个监测点作为一个整体反映的区域应变状态为北北东向(N9°E)挤压, 北西西向拉张, 最大剪应变率为 $0.027 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 面膨胀率为 $-0.012 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$. 这些结果反映了青藏高原现今地壳形变与应变情况, 与从地质、地震资料得到的青藏高原现代构造形变特征是一致的. 这些结果也表明青藏高原三维地壳运动可能是在多因素驱动力作用下形成的.

GPS 观测较好地描述了青藏高原现今三维地壳运动学, 进一步的 GPS 观测与研究将为解决青藏高原现今地壳运动的动力学机制问题起关键作用.

致谢 本工作作为国家自然科学基金(批准号: 49234070, 49974001, 49904001)和国家杰出青年科学基金(批准号: 49725411)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10: 611~616
- 2 Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward M P, Ries A C,

- eds. Collision Tectonics. London: Geological Society Special Publication, 1986, 19: 116~157
- 3 Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach. *J Geophys Res*, 1988, 93: 15085~15117
 - 4 Armijo R. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *J Geophys Res*, 1986, 91: 13803~13872
 - 5 Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet. *J Geophys Res*, 1989, 94: 2787~2838
 - 6 Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 895~898
 - 7 England P, McKenzie D P. A thin viscous sheet model for continental deformation. *Geophys J R Astr Soc*, 1982, 73: 523~532
 - 8 Cobbold P R, Davy P. Indentation tectonics in nature and experiment, 2. Central Asia. *Bull Geol Inst Uppsala*, 1988, 14: 143~162
 - 9 Holt W E, Li M, Haines A J. Earthquake strain rates and instantaneous relative motions within central and eastern Asia. *Geophys J Int*, 1995, 122: 569~593
 - 10 Molnar P, Gipson M. A bound on the rheology of continental lithosphere using very long baseline interferometry: The velocity of south China with respect to Eurasia. *J Geophys Res*, 1996, 101: 545~554
 - 11 England P, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation, 2. Comparison with the India-Asia collision zone. *J Geophys Res*, 1986, 91: 3664~3676
 - 12 England P, Molnar P. The field of crust velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults. *Geophys J Int*, 1997, 130: 551~582
 - 13 Ren J, Holt W E, Shen-tu B. The anti-clockwise rotation of the southeastern Asia block. *Eos Trans, AGU*, 1997, 78: 117
 - 14 张青松, 周耀飞, 陆祥顺, 等. 现代青藏高原上升速度问题. *科学通报*, 1991, 36(7): 529~531
 - 15 Jackson M, Bilham R. Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet. *J Geophys Res*, 1994, 99(B7): 13897~13912
 - 16 Zhang C J. Study on the Qinghai-Xizang crust and its movements via the temporal and spatial gravity distribution. *Seismology and Geology*, 1996, 18(3): 237~244
 - 17 王 琪, 游新兆, 王启梁. 用 GPS 监测青藏高原地壳形变. *地震地质*, 1996, 18(2): 97~108
 - 18 朱文耀, 程宗颐, 熊永清, 等. 利用 GPS 技术监测青藏高原地壳运动的初步结果. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(5): 385~389
 - 19 Bilham R, Larson K, Freymueller J, et al. GPS measurements of present day convergence rates in the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 336: 61~64
 - 20 Shen Z K, Zhao C K, An Y, et al. Contemporary crustal deformation in East Asia constrained by global positioning system measurements. *JGR*, 2000, 105: 5721~5734
 - 21 Larson K M, Burgmann R, Bilham R, et al. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements. *J Geophys Res*, 1999, 104(B1): 1077~1093
 - 22 Freymueller J, Chen Q Z, Yang Z Q, et al. Present-day kinematics of the Tibetan Plateau and its Margins. In: 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, June 27-30, 2000, Tokyo, Japan. 208
 - 23 Liu J N, Xu C J, Song C H, et al, Study of the crustal movement in the middle east region of the Qinghai-Xizang plateau with GPS measurements. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41: 518~524
 - 24 张 强, 朱文耀. 中国地壳各构造块体运动模型的初建. *科学通报*, 2000, 45(9): 967~974
 - 25 DeMets C, Gordon R, Argus D, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(16): 2191~2194
 - 26 顾国华, 孙汉荣, 孙惠娟, 等. 利用 GPS 地形变资料在大地坐标系中计算应变. *地壳变形与地震*, 1998, 18(3): 26~31
 - 27 Molnar P, Deng Q. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia. *J Geophys Res*, 1984, 89: 6203~6228
 - 28 Molnar P H, Lyon-Caen, Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan plateau and its margins. *Geophys J Int*, 1989, 99: 123~153
 - 29 Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *J Geophys Res*, 1986, 91: 13803~13872

(2000-04-19 收稿, 2000-08-04 收修改稿)