

应用高精度 GPS 监测鲜水河断裂的现代地壳运动

刘宇平 唐文清 陈智梁 张清志 赵济相 张选阳

成都地质矿产研究所, 四川 成都,

[摘要]: 近年来我们用 GPS 对鲜水河断裂的活动性进行监测, 获得了鲜水河断裂带及邻区的现代地壳运动速度矢量场, GPS 结果表明鲜水河断裂的左旋走滑是由于西南盘的运动速度高于东北盘的表现, 同时鲜水河断裂的南段速度高于北段的运动速率。鲜水河断裂的形成与印度板块东北角的南迦巴瓦-阿萨姆犄角向欧亚板块楔入有关, 楔入的结果形成东喜马拉雅构造结和围绕它的顺时针旋转构造。

[关键词]: 鲜水河断裂带 GPS 观测 现今地壳形变

1 引言

众所周知, 鲜水河断裂是现今青藏高原上最活动断裂, 也是青藏高原东部一个重要的构造边界。自第四纪特别是晚更新世以来, 呈强烈左旋走滑运动, 断裂带内多次重复发生强震, 发震频度较高。

作为川滇菱形块体的东北边界, 鲜水河断裂以左旋走滑为特征, 广义的鲜水河断裂以甘孜拉分盆地为界分为北段的甘孜-玉树断裂带和南段狭义的鲜水河断裂带。甘孜-玉树断裂带起于四川甘孜, 经青海玉树、结隆、当江, 消失于冬布里山北麓勒玛曲第四纪盆地, 全长 650 公里, 呈北 60°-70° 方向展布, 总体倾向北东, 倾角在 60°-80°, 是一条高角度走滑逆冲断裂。

狭义的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 NW 50°~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 NW 10°~30°, 结构比较复杂。

由于鲜水河断裂的特殊性, 已引起大量地质和地震地质研究者的注意, 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狭义鲜水河断裂带北西段走滑速率约 10~15 mm/a。

由于 GPS(Global Positioning System, 全球定位系统) 具有高精度、全天候、低成本、机动灵活等诸多优点, 用 GPS 研究地壳运动及形变是国内外大地测量及地球物理学者关注的前沿学科。本文通过鲜水河区域和局部 GPS 监测的结果, 探讨鲜水河断裂的现今形变活动特征, 形成鲜水河断裂的地球动力学机制及与地震活动的关系。

2 鲜水河断裂的 GPS 监测及结果

2.1 GPS 观测及数据处理

为了应用 GPS 监测鲜水河断裂的现代运动量, 2001 年我们建立了云南中甸(TAC3) — 四川红原刷金寺(SJS) 的鲜水河断裂 GPS 监测剖面, 该剖面长约 500km, 呈北东走向 30° 走向, 近于垂直鲜水河的南段的走向(图 1, B-B' 剖面), 该剖面可监测鲜水河断裂的南段。同时在甘孜-玉树断裂的两盘分别设石渠(SEX)、达日(DAR)、甘孜(GAZ) GPS 监

测站，加上 1996 年布设的玉树站 (BTX4) 可监控甘孜-玉树断裂。结合 1991-2001 年在鲜水河断裂及邻区建立的 GPS 站，可构成一个局部的 GPS 网，可在鲜水河断裂的走向及倾向方向上进行监控。所有 GPS 测站在 2001 年和 2003 年用 Trimble 4000SSI 进行了两期观测，部分测站 (如 BTX4、HKZ、TAC 等) 经历了三期以上的观测。

数据分析处理采用美国麻省理工学院的 GAMIT/GLOBK (10.1) 软件按三步进行：第一步是用 GAMIT 软件对每年每天 GPS 的观测数据进行解算；第二步用 GLOBK 软件进行多时段综合解算，以获得网平差的结果，进行重复度的计算及评估数据的质量，对每年的数据进行整体集合；第三步参考框架的选取及测站速度矢量计算，通过新老数据进行联算，获得了不同参考框架下鲜水河断裂的现代地壳运动速度场，为了便于对比研究，列出了欧亚框架下鲜水河断裂及邻区的 GPS 测站的东向量、北向量、垂向分量及水平矢量值 (表 1, 图 1)。获得的结果表明，测站的水平运动速度的在 $[(9.4-22.68) \pm (1.5-4.2)]\text{mm/a}$, 3 次及以上的监

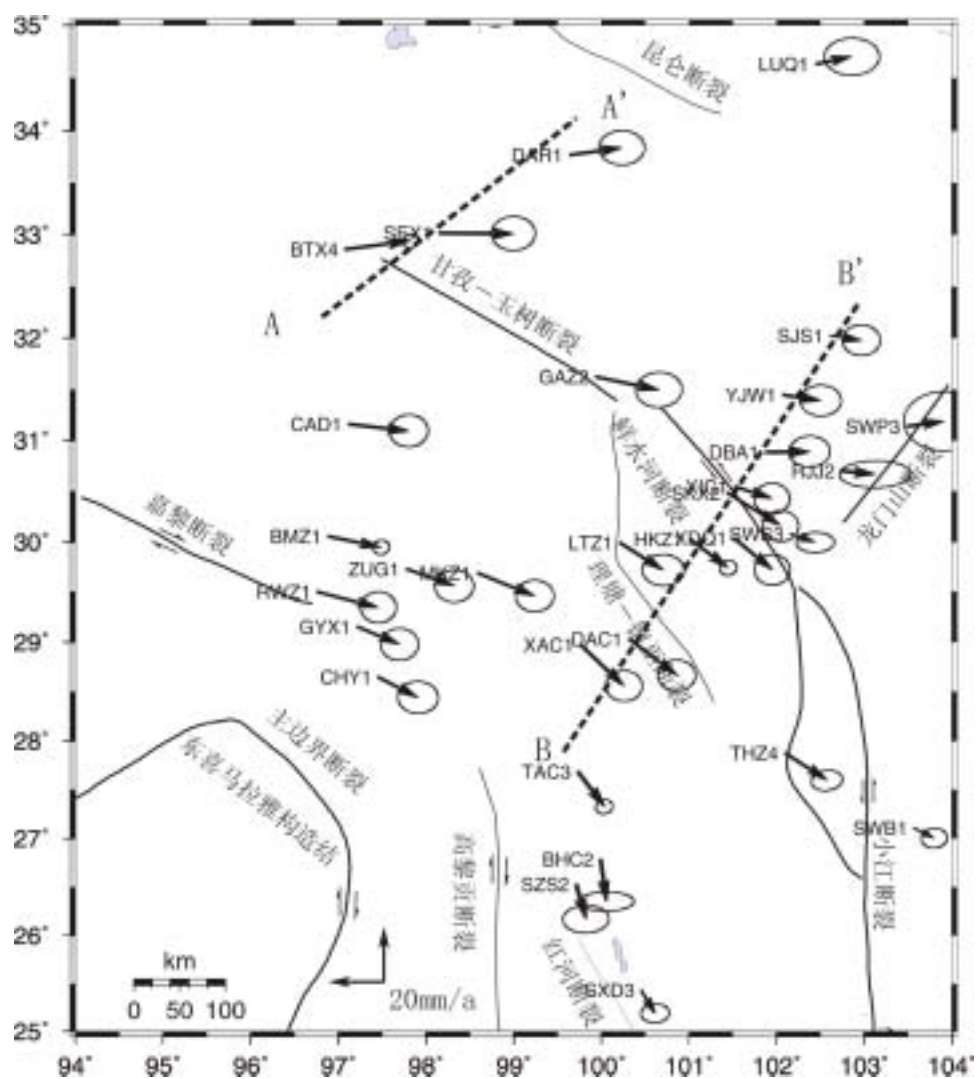


图1 欧亚框架下鲜水河断裂带及邻区GPS测站速度矢量场

测速度不定度可在 2mm/a。GPS 监测结果表明鲜水河断裂的南段运动速率高于北段的运动速率。

表1 欧亚框架下鲜水河断裂GPS测站速度各分量值

测站	测站坐标		东向分量(mm/年)		北向分量(mm/年)		水平运动矢量			垂向分量(mm/年)	
	经度	纬度	测算值	不定度	测算值	不定度	测算值	不定度	方向	测算值	不定度
TAC3	99.73	27.68	9.62	1.25	-12.77	1.07	15.99	1.65	142.99	2.22	1.93
XAC1	99.77	28.97	15.61	2.70	-14.95	2.27	21.61	3.53	133.74	15.28	6.46
DAC1	100.32	29.03	17.23	2.77	-13.20	2.28	21.71	3.59	127.43	12.66	6.08
LTZ1	100.21	29.99	15.65	3.11	-10.00	2.32	18.57	3.88	122.55	72.99	6.61
HKZ1	101.01	30.03	13.86	1.26	-10.52	1.09	17.40	1.67	127.17	1.75	2.17
XDQ1	101.51	30.04	13.98	2.63	-11.60	2.26	18.17	3.47	129.66	16.50	5.73
SKX2	101.44	30.48	19.30	2.66	-11.91	2.28	22.68	3.50	121.65	13.22	6.13
SWS3	102.16	30.08	8.91	2.83	-2.98	1.48	9.40	3.19	108.46	8.00	4.09
XIC1	101.53	30.55	13.41	2.64	-4.28	2.28	14.08	3.49	107.66	12.14	6.00
DBA1	101.88	30.89	15.82	3.01	0.17	2.32	15.82	3.80	89.43	8.28	9.64
YJW1	102.08	31.45	13.59	3.04	-2.06	2.28	13.75	3.80	98.58	15.17	6.84
SJS1	102.61	32.03	11.24	2.80	-1.75	2.28	11.38	3.61	98.81	12.47	6.39
GAZ2	99.94	31.63	22.77	3.44	-4.72	2.59	23.25	4.31	101.67	15.69	8.03
BTX4	97.08	32.86	23.60	1.15	3.08	0.99	23.80	1.52	82.61	3.14	1.83
CAD1	97.12	31.16	21.63	2.87	-2.49	2.38	21.77	3.73	96.52	4.16	6.42
SEX1	98.15	33.02	26.81	3.23	-0.21	2.53	26.81	4.10	90.40	10.30	7.24
DAR1	99.64	33.77	18.81	3.38	2.65	2.55	19.00	4.23	82.02	18.32	7.35

2.2 鲜水河断裂北段 GPS 监测结果

鲜水河断裂的北段为甘孜-玉树断裂,在该断裂带的周边有昌都(CAD1)、玉树(BTX4)、石渠(SEX1)、达日(DAR1)、甘孜(GAZ2)等测站。GPS获得的东向分量在 $[(18.81 \sim 26.81) \pm (1.15 \sim 3.38)]\text{mm/a}$;北向分量为 $[(3.08 \sim 2.49) \pm (0.99 \pm 2.53)]\text{mm/a}$;水平运动矢量为 $[(19 \sim 28.81) \pm (1.52 \sim 4.31)]\text{mm/a}$,GPS监测的结果表明在欧亚框架下的总体运动速率值较高,并以东向分量远远大于北向分量,且东分量的速率是北向分量的8~11倍,总体是向东运动,其中以SEX1的东向分量达到 26.81mm/a ,为青藏高原东部最大的东向分量。表明地壳运动总体以向东运动为特征,并以向东速度矢量降低为特征,由于整体的运动速度较高,相对差异较小,因此甘孜-玉树断裂的两盘相对运动量不大性。在横切甘孜-玉树断裂的玉树(BTX)、石渠(SEX)、达日(DAR1)GPS剖面(图1, A-A'剖面,图2),由于石渠表现出较大的东向分量,相对于石渠站,玉树以 4.6mm/a 的速度 $\text{NW}45^\circ$ 方向运动,表明甘孜-玉树断裂在玉树与石渠之间表现为右旋走滑性质,沿断裂走向方向的走滑速率为 4.43mm/a ,垂直断裂方向挤压速率为 1.23mm/a ;相对于石渠站,达日站以 8.50mm/a 向 $\text{NW}70^\circ$ 方向运动,两站之间的玉曲河、达科断裂等表现为左旋走滑的性质,沿断裂走向($\text{NM}60^\circ$)方向的走滑速率为 8.35mm/a ,垂直于断裂方向的挤压速率为 1.55mm/a ,表现为挤压-走滑性质。

2.3 鲜水河断裂南段监测结果

鲜水河断裂南段即是狭义的鲜水河断裂,从中甸(TAC3)-刷金寺(SJS1)GPS剖面(图1, B-B')可获得鲜水河断裂的地壳运动,在欧亚框架下自南向北,鲜水河断裂剖面各测站的速度为:中甸(15.99 ± 1.65) mm/a -道孚乾宁色卡(22.68 ± 3.50) mm/a -刷金寺(11.38 ± 3.61) mm/a ,速度矢量方向(自南向北)为SE~E,西南盘各测站的运动速度明显高于东北盘各测站的运动速度,因而表现出强烈的左旋走滑。

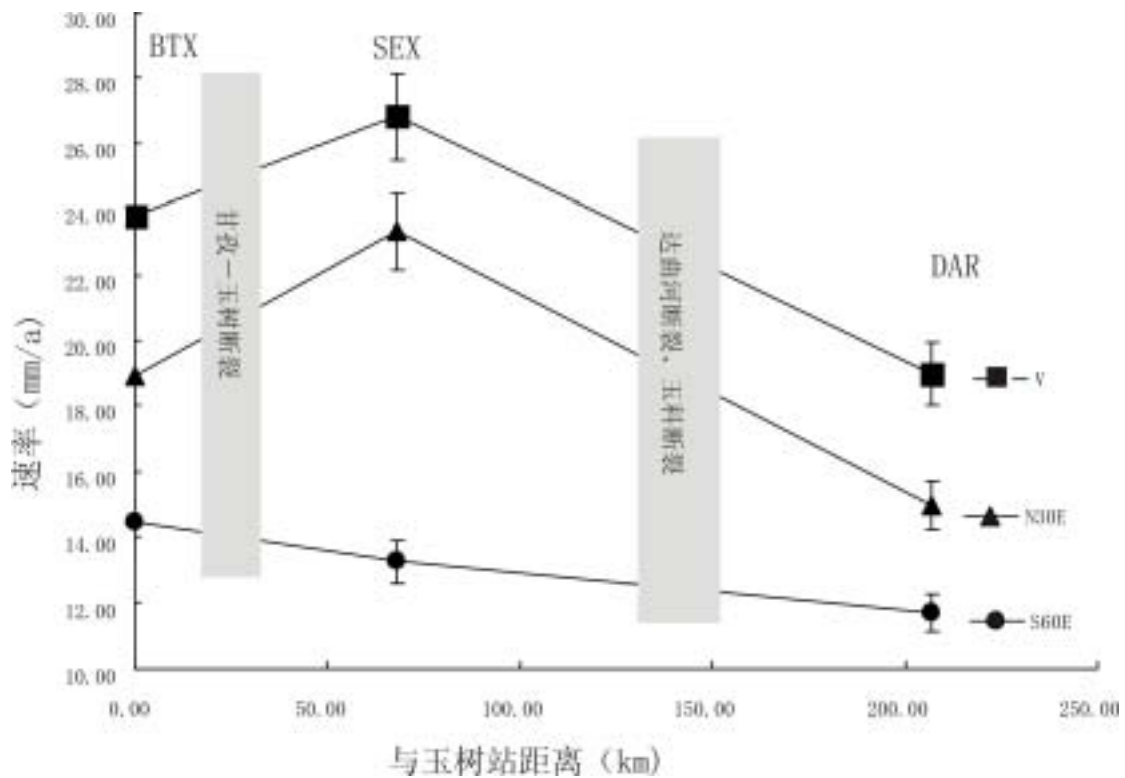


图2 鲜水河断裂北段垂直于走向($N30^{\circ}E$)剖面方向上GPS获得的速度变化图

在欧亚框架下,鲜水河断裂 GPS 监测剖面上,鲜水河断裂剖面的 GPS 监测成果,表明断裂的强应变带较窄、陡立,变形集中,而且活动的深度不大;显示强左旋平移兼伸展的运动。这些特征显示鲜水河断裂是重要的地形变的分界断裂,也是重要的地震断裂。

如果将各测站的速度投影于垂直于鲜水河断裂走向($N30^{\circ}E$)和平行于断裂走向($S60^{\circ}E$),GPS速度矢量在断裂带附近表现出明显的突变(图3),以鲜水河断裂表现出明显的突

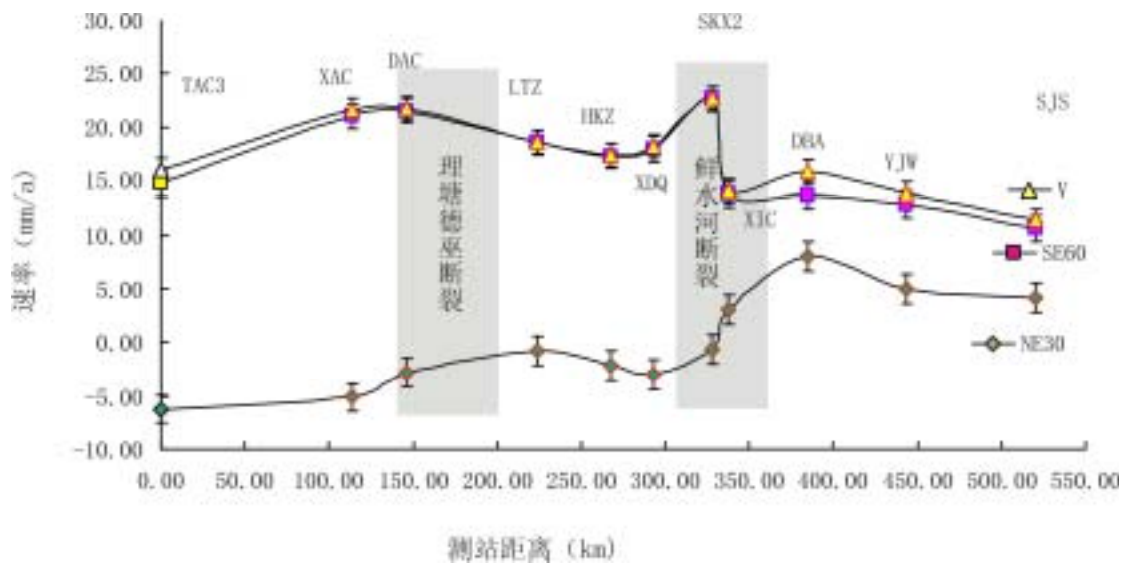


图3 鲜水河断裂南段GPS剖面测站速度矢量变化

变,表明其活动性较强,以乾宁色卡(SKX2)速度最大,它的东盘运动速率总体上减小,如

果相对于SKX2，东盘的运动速率大于西盘，表现出左旋走滑的特征，相对于SKX2，鲜水河断裂的东盘向北西运动，其运动速率在 (9.64 ± 4.30) mm/a~ (12.97 ± 4.81) mm/a (图4)。

剖面经过了理塘 - 德巫断裂，GPS结果显示理塘 - 德巫断裂两盘的速度平缓变化，相对西盘，东盘向北西30° - 50°方向以3.5-4.3mm/a速率位移，与地质地貌法估算的5mm/a的平均滑位速率接近，理塘 - 德巫断裂表现左旋走滑。

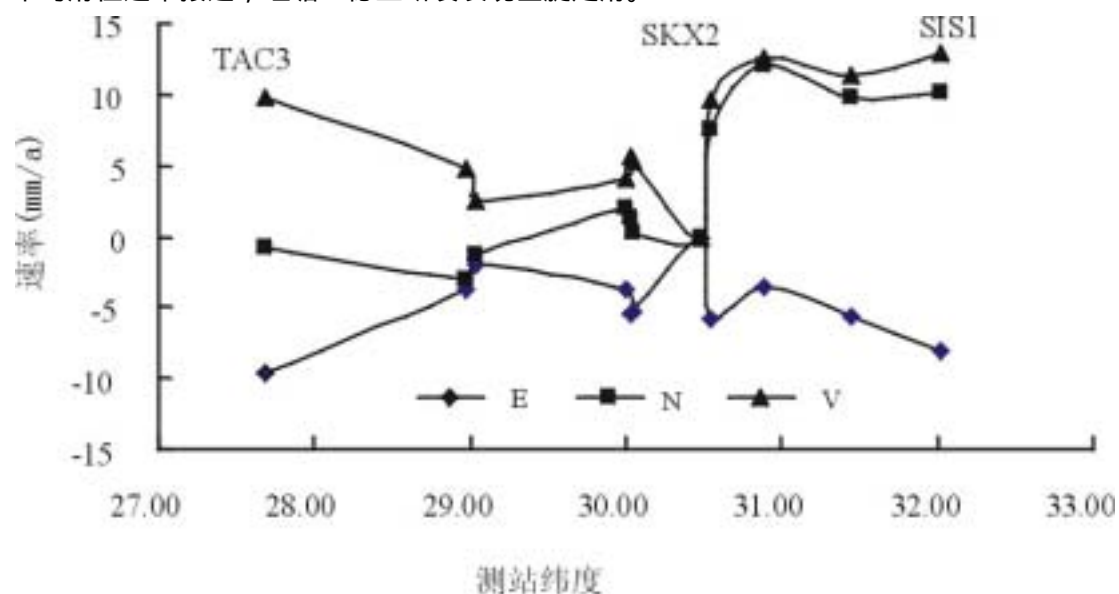


图4 沿NE30方向鲜水河断裂各GPS测站相对于SKX2的速度变化

3 构造解释及地质意义

鲜水河 - 小江断裂是川滇地块和川青地块的边界断裂(图5),GPS结果指示川滇地块和川青地块总体上都向SEE运动,但由于川滇地块的运动速率高于川青地块,两地块之间相对表现为左旋走滑的运动特征。鲜水河断裂的南段,相对速度差较大,断裂的相对运动速率在9~12mm/a,而在甘孜 - 玉树断裂段,相对运动速率较小,断裂相对运动速率在8.5mm/a。

根据GPS监测,印度板块与阿拉善地块(华北地块)的青藏高原中部(沿班加罗尔 - 拉萨 - 格尔木 - 金塔一线方向),地壳运动的主要为方向N20°E,从印度板板块的南部班加罗尔到华北地块上的金塔,速度从 (40.90 ± 1.30) mm/a降为 (5.48 ± 1.11) mm/a,印度板块与华北地块之间向北汇聚速率逐渐被吸收^[10]。

GPS监测表明青藏高原东边界与华南地块的速度差没有转换成逆冲和地壳缩短,而是被顺时针的旋转所调节和吸收。由于印度板块东北角的南迦巴瓦-阿萨姆犄角的楔入作用和扬子地块的阻挡作用,在青藏高原东部形成以东喜马拉雅构造结(EHS)和以EHS为中心的顺时针的涡旋(图5)。印度板块东北角向北东方向的运动转换为顺时针的旋转,由于旋转速率的差异,在顺时针涡旋的内部形成右旋走滑性质的断裂构造,而在外部形成左旋走滑性质的断裂,鲜水河 - 小江断裂是的涡旋的外部边界,具有左旋走滑的特征,因而表现出极强的活动性,因此它是重要的地震活动带。

在青藏高原东部,由于印度板块东北角南迦巴瓦 - 阿萨姆“犄角”楔入作用和扬子地块的阻挡作用,在西藏东部、川西和滇西地区发生物质的向东流动挤出有关,然而这种挤出运动在高原东部及东部边缘以多种形式大部分被吸收^[5]。

青藏高原上的GPS观测结果的地壳运动图像^[6,12]与模拟结果^[7,8]和地质考察相吻合,如

在青藏高原中部主要表现为北到北东向的地壳缩短;而在青藏高原东部的运动为顺时针旋转,表征了高原物质的向东流动。

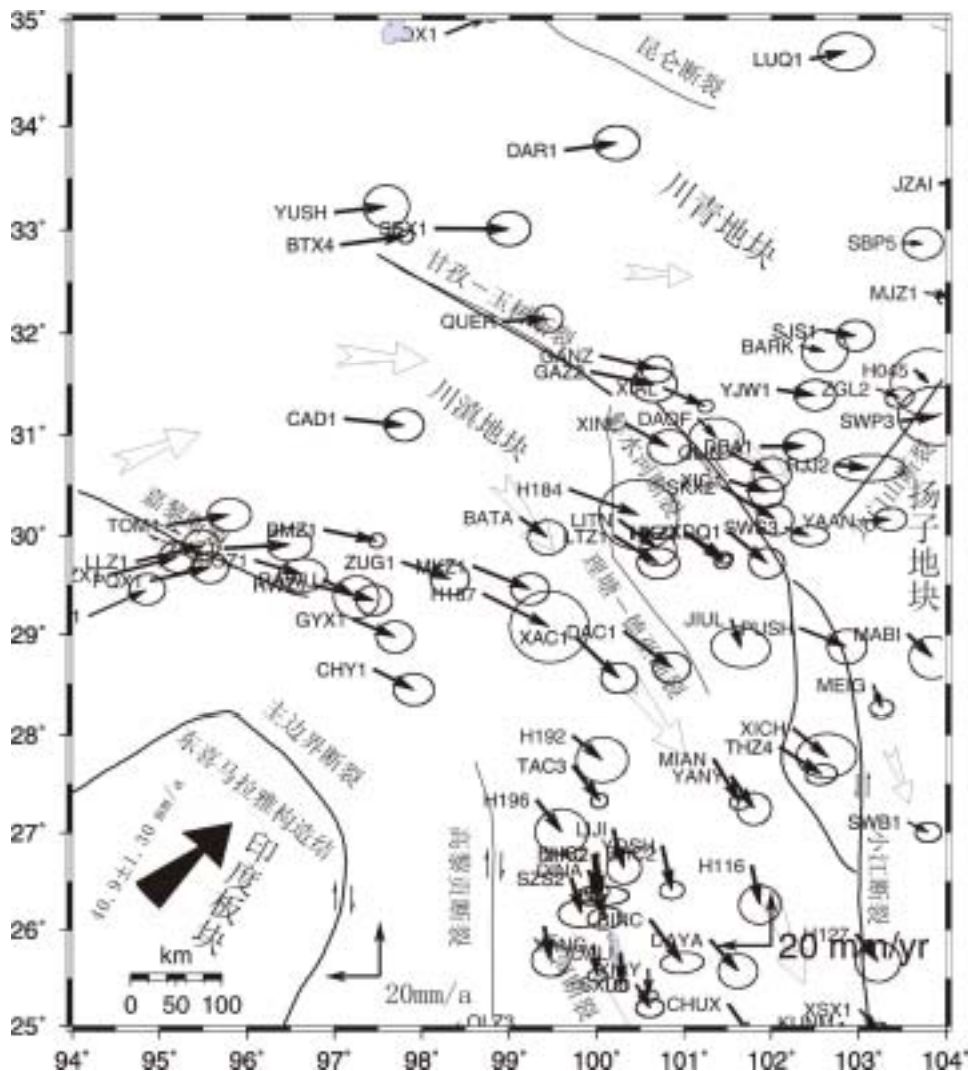


图5 青藏高原东缘构造及现代地壳运动略图

注：除图1的1991-2003年实测数据外，其余数据资料据参考文献[6]

参考文献

- [1] 唐荣昌,韩渭宾,等.四川活动断带断裂与地震(M). 北京:地震出版社,1993. 67 ~ 138.
- [2] 刘本培,朱智勤,廖华等.:鲜水河断裂带的构造大地测量,地壳形变与地震,第21卷第4期,17 - 25
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] 汪一鹏 沈军,王琪,熊熊,2003,川滇块体的侧向挤出问题,地学前缘(中国地

- 质大学,北京), 第10 卷特刊, 188-192。
- [6] Qi Wang, Pei-Zhen Zhang, Freymueller J, Bilham R, Larson K, Xi'an Lai, et al., 2001, Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 294: 574-577
- [7] Feng Shen, Leigh H. Royden and B.C. Burchfiel, 2001, Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, No B4, 6793-6816.
- [8] Royden, L.H., Burchfiel, B. C., King, R.W., Wang, E., Chen, Z., Shen, F., Liu, Y., 1997, Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet, *Science*, v276, 788-790.
- [9] W.E. Holt, N. Chamot-Rooke, X.Le Pichon, et al , Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations[J], *Journal of Geophysical Research*, 2001,106(B9), 19,185-19,209.
- [10] 刘宇平, 陈智梁等: 青藏高原东部及周边现时地壳运动, 沉积与特提斯地质, 2003, Vol 23. No4, p1-8.
- [11] 刘宇平、潘桂堂、耿全如等, 2000, 南迦巴瓦构造结的楔入及其地质效应. 沉积与特提斯地质, 2000, Vol20.No1, p52-59。
- [12] Yuping Liu, Zhiliang Chen, Wenqing Tang et al, 2002, GPS Monitoring of Crustal deformation in Eastern Tibetan Plateau, *EOS. Trans. AGU*, 83(47), Fall, Meet. Suppl., Abstract.
- [13] 唐文清, 刘宇平, GPS 技术的进一步发展及应用, 沉积与特提斯地质, 2002, Vol22. No1, p88-91.
- [14] Z.Chen., B.C. Burchfiel, Y.Liu et al., 2000, Global Position System measurements of eastern Tibet and their implication for India/Eurasia intercontinental deformation, *Journal of Geophysical Research*.