

Qiao X J, Wang Q, Du R L. Characteristics of current crustal deformation of active blocks in the Sichuan-Yunnan region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(5): 805 ~ 811

川滇地区活动地块现今地壳形变特征

乔学军 王 琪 杜瑞林

中国地震局地震研究所 GPS 实验室, 武汉 430071

中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘 要 利用川滇地区 1998~2002 年间 200 多 GPS 点位的多期复测结果, 将川滇地区分为 9 个次级活动块体, 计算了各个活动块体的欧拉旋转矢量和主要活动断裂的运动速度, 并分析了该地区的应变场特征. 结果表明, 川滇地区的地壳运动速度具有北强南弱、西强东弱、以菱形块体为主顺时针旋转的特征; 菱形块体外各个块体运动速度大幅衰减; 与地质结果的差异表明, 川滇菱形块体的现今地壳运动由北往南逐渐增强; 青藏高原物质的侧东向挤出在滇中块体南部明显下降, 而丽江-小金河断裂带的吸收作用并不明显; 川滇地区以压应变为主, 四川石棉和云南新平一带出现的应变集中地区也许具有发生中强地震的可能性.

关键词 川滇 活动块体 GPS 地壳形变

文章编号 0001-5733(2004)05-0805-07 中图分类号 P541 收稿日期 2003-06-10, 2004-05-11 收修定稿

CHARACTERISTICS OF CURRENT CRUSTAL DEFORMATION OF ACTIVE BLOCKS IN THE SICHUAN-YUNNAN REGION

QIAO Xue-Jun WANG Qi DU Rui-Lin

GPS Laboratory, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract The Sichuan-Yunnan area are divided into nine active secondary crustal blocks based on several GPS repeat surveys at more than 200 GPS sites during 1998~2002. The Euler rotation vectors of nine secondary blocks, the velocities of main faults and strain field of the area are calculated and analyzed. The results indicate that the crustal movement of the area in north and west are stronger than that of south and east. The Sichuan-Yunnan rhombic block is characterized by clockwise rotation. The velocities of those blocks outside the rhombic block decrease swiftly. Different rates derived from GPS and geology data show that the current crustal motions become stronger from north to south within the rhombic block. The eastward extrusion of the Qinghai-Xizang plateau presents a marked drop in the middle-Yunnan block and the absorption effect of the Lijiang-Xiaojinhe fault is invisible. The Sichuan-Yunnan area is dominated by compressive strain. The strain concentration at Shimian of Sichuan province and Xinping of Yunnan province implies a possible moderate or major seismic risk.

Key words Sichuan-Yunnan, Active block, GPS, Crustal deformation.

1 引 言

位于青藏高原东南缘的川滇菱形块体的地壳运

动主要以鲜水河、安宁河、则木河、小江、红河、澜沧江、龙门山等深大断裂的强烈构造活动为特征, 新生代以来受青藏高原物质向东侧流动^[1~3]及阿萨姆(Assam)顶点楔入的作用, 使该地区构造活动复杂,

基金项目 国家自然科学基金(40304002, 40074024)资助.

作者简介 乔学军, 1968 年生, 1990 年毕业于南方冶金学院, 副研究员, 从事空间大地测量与地球动力学、现今地壳运动研究.

Email: whgps1@public.wh.hb.cn

地震活动强烈而频繁,是研究地壳形变与地震的有利地区之一。陈智梁等^[4]分析 1991 ~ 1997 年间的 GPS 观测资料,认为川滇地块的形变表现为顺时针旋卷构造和块体边界断裂的非均一滑动;王琪等^[5,6]根据 GPS 结果揭示了川滇活动块体以顺时针向 SSE 方向运动的特征;申重阳等^[7]利用 GPS 资料对川滇地区活动断裂的运动特征进行了反演,对活动断层的运动进行了模拟。由于 GPS 资料的稀少,以前对川滇地区活动断裂的形变研究以大尺度为主,研究结果主要反映川滇块体的整体运动特征,“九五”期间通过“中国地壳运动观测网络”工程(以下简称网络工程)的建设及国家重点基础研究发展规划“973”项目的实施,在川滇地区建立了由 200 多 GPS 点位组成的监测网,并进行了多期有效的复测。本文基于 1998 ~ 2002 年间三期 GPS 复测资料,将川滇地区划分为 9 个活动块体,对川滇块体的次级块体及其现今地壳运动和变形特征进行了分析。

2 主要活动断裂的运动特征

川滇菱形块体及其边界断裂带是中国大陆地震

活动最强烈的地区之一。NE 向的丽江—小金河断裂将川滇菱形地块分成滇中和川西北两个次级活动地块(图 1),川西北活动块体由北西向甘孜—玉树—鲜水河断裂带(北界)、丽江—小金河断裂带(南界)、金沙江断裂带(西界)等活动断裂围限。滇中块体是由丽江—小金河断裂、安宁河—小江断裂和红河断裂所围限的三角形区域。块体内主要构造线是近南北向断裂带,如程海断裂带的永胜—宾川段、元谋断裂带、易门断裂带和普渡河断裂带等。在块体的东南端,发育了 NW 向的通海断裂和石屏断裂,这两条断裂带向西北逐渐合并为一条(也称楚雄建水断裂),块体内部的南北向断裂以张性活动为主。

从晚第四纪开始,川滇菱形块体从北边界的甘孜—玉树—鲜水河断裂带,东北边界的鲜水河断裂,东边界的安宁河断裂北段,到南边界的丽江—小金河断裂以左旋走滑运动为主^[8],且左旋走滑速度依次减少^[9];而菱形块体西界的金沙江、红河断裂带则以右旋走滑运动为主^[10];滇中次级块体的丽江—小金河断裂带、安宁河断裂南段、则木河断裂表现为连续的走滑运动特征^[11]。

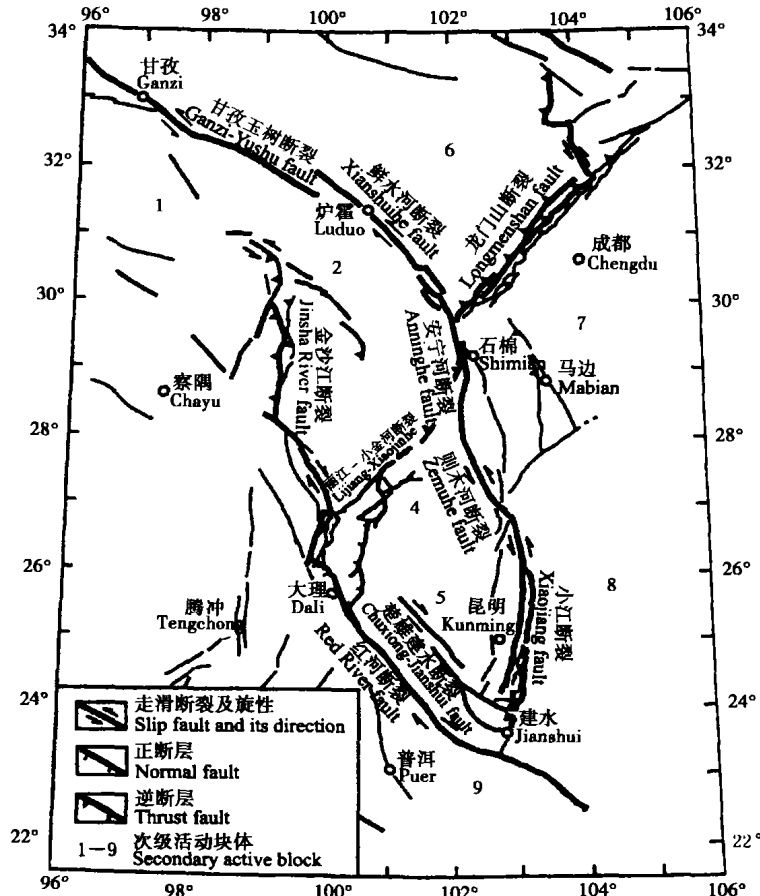


图 1 川滇地区主要活动断裂

Fig. 1 Distribution map of main active faults in Sichuan-Yunnan region

3 GPS 观测及数据处理

网络工程的建设与运行及“973”项目的实施,分别于1998年、1999年、2001年及2002年完成了川滇地区200多GPS点位复测和加密观测^[12, 13]。

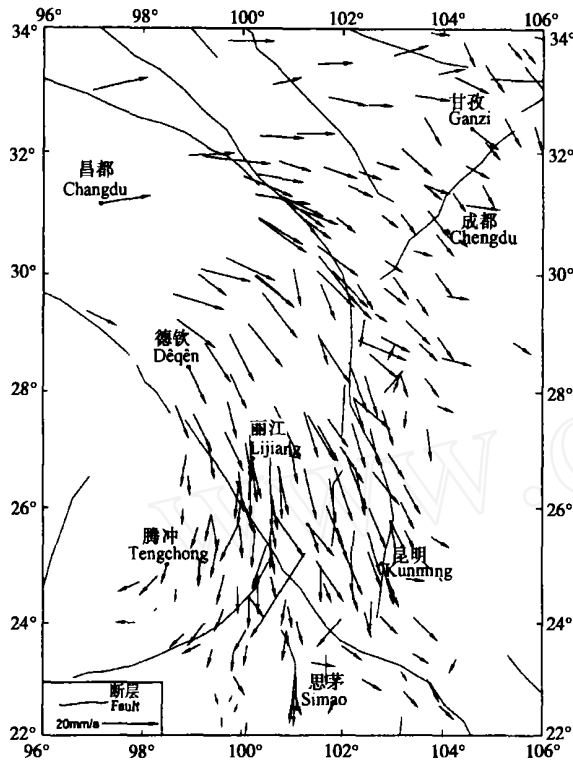


图2 川滇地区相对欧亚板块的GPS水平速度场 (1998~2002)

Fig. 2 GPS-derived horizontal velocity relative to Eurasia plate in Yunnan and Sichuan area (1998~2002)

GPS数据处理采用美国喷气推进实验室(JPL)研制的GIPSY/OASIS-II软件,将川滇地区的GPS观

测数据与中国大陆及周边地区各IGS(International GPS Service)站的数据及网络工程的GPS观测数据联合进行结算,采用无基准(Non-fiducial)算法,首先计算各测站三维坐标及其方差-协方差的单时段解,以ITRF2000作为统一框架,通过最小二乘解算,将所有单时段解作整网动态平差,得到各站在ITRF2000下的三维地心坐标、运动速度及对应方差-协方差,最终将ITRF2000框架下的运动场转换为稳定的欧亚板块参考框架下的相对运动场,图2为1998~2002年由GPS获得的川滇地区的水平运动速度场。GPS数据处理的水平向精度为3~5mm,垂直向为9~12mm,东西向、南北向的速度估算精度优于2.0mm/a,垂直向优于3.2mm/a。GPS数据处理中有关参数的选择与设置见文献[5]。

4 水平运动与应变场特征

GPS水平速度场的结果显示,由于青藏高原的东向挤出在川滇地区转换成一系列顺时针旋转条带,由此引起活动块体以不同的速度和方向运动,活动地块是被形成于晚新生代、晚第四纪(10~12万年)至现今强烈活动的构造带所分割和围限、具有相对统一运动方式的地质单元,通常情况下,川滇地区由印支块体、川滇菱形块体、龙门山块体、滇东块体组成^[14],根据川滇地区的活动断裂带分布^[15~17]及川滇块体由北往南、由西往东活动逐渐衰减的特性,同时,利用前期GPS结果揭示的本区活动块体具有以活动断裂带为边界的水平差异运动特点^[18],将川滇地区分为9个块体(图1和表1),其中,将菱形块体中的川西块体和滇中块体分成南北两个次级块体。根据GPS观测的水平速度场,基于块体刚性运

表1 川滇地区活动块体欧拉矢量及运动特征

Table 1 Euler vectors and velocity of active blocks in Sichuan-Yunnan region

块体	说明	欧拉极(°)		角速度(°/a)	旋转矢量(°)			EW速度 (mm/a)	SN速度 (mm/a)	水平速度 (mm/a)	运动 方向(°)
		θ	ϕ		x	y	z				
1	藏东块体东	23.35 ±2.62	99.85 ±15.21	0.87 ±0.01	0.12 ±0.04	-0.79 ±0.25	-0.34 ±0.16	14.27	-0.70	14.29	92.79
2	川西块体北段	23.17 ±1.78	94.26 ±13.06	0.88 ±0.00	0.06 ±0.04	-0.81 ±0.21	-0.35 ±0.13	11.45	-9.79	15.07	130.54
3	川西块体南段	24.68 ±1.18	91.33 ±19.88	0.89 ±0.01	0.02 ±0.06	-0.81 ±0.32	-0.37 ±0.17	4.67	-14.29	15.03	161.89
4	滇中块体北段	20.60 ±1.39	82.23 ±11.07	0.40 ±0.02	-0.05 ±0.03	-0.37 ±0.18	-0.14 ±0.09	3.54	-13.67	14.12	165.49
5	滇中块体南段	26.28 ±0.79	111.07 ±25.27	0.75 ±0.18	-0.24 ±0.10	0.63 ±0.46	0.33 ±0.22	2.39	-11.29	11.54	168.03
6	龙门山块体	26.69 ±0.81	99.02 ±8.40	0.74 ±0.01	0.10 ±0.03	-0.65 ±0.14	-0.33 ±0.09	6.51	-5.45	8.49	129.95
7	川东北块体	42.70 ±2.44	126.77 ±10.14	0.16 ±0.04	-0.07 ±0.05	0.10 ±0.20	0.11 ±0.12	4.72	-5.31	7.11	138.36
8	滇东块体	34.45 ±2.85	118.54 ±15.36	0.26 ±0.09	-0.10 ±0.07	0.19 ±0.29	0.15 ±0.14	5.25	-6.25	8.16	139.99
9	印支块体	18.62 ±3.78	10.95 ±3.37	0.06 ±0.17	-0.05 ±0.03	-0.01 ±0.16	-0.02 ±0.07	-1.76	-5.94	6.19	196.55

动的假设,通过欧拉矢量法对各个块体的运动矢量进行了计算和模拟,结果见表 1. 由块体的欧拉矢量可计算出各个主要断裂带的运动速度(表 2).

表 2 川滇断裂带运动速度比较

Table 2 Deformation rate comparison of Sichuan-Yunnan faults between GPS and geology

断裂带	GPS 测定滑动速度	地质测定滑动速度	地质资料来源
	(mm/a)	(mm/a)	
鲜水河	10.4 ±0.2	13 ±5	[9]
安宁河	10.5 ±0.3	5.1	[19]
则木河	7.3 ±0.1	5.9 ±1.1	[14]
小江	2.5 ±0.1	6.7	[16]
红河	6.9 ±0.4	3.5	[10]
龙门山	1.7 ±1.5	1~2	[20]
丽江—小金河	1.8 ±0.7	3.6 ±0.2	[11]

表 1 表明,川滇地区活动块体的运动特点为

(1) 块体水平运动速度由北往南逐渐减小,菱形块体北部和中部的运动速度为 14~15mm/a,南部的运动速度为 11.5mm/a,而印支块体的运动速度为 6.4mm/a,滇南块体的运动速度衰减了近 20%,红河断裂带南部两侧块体的运动速度差为 5.35mm/a,印支块体的运动速度衰减约为 46%;

(2) 块体水平运动速度由西往东快速减小,以鲜水河断裂为界,其西南侧的藏东块体、川西块体北与东北方的龙门山块体的运动速度相差近 6mm/a(图 3),块体运动速度约衰减了 42%;以安宁河断裂和则木河断裂为界,其左右两侧块体的运动速度相差近 7.5mm/a,块体运动速度约衰减了 48%;以小江断裂为界,其左右两侧块体的运动速度差别约为 3.4mm/a,块体运动速度约衰减了 29%;

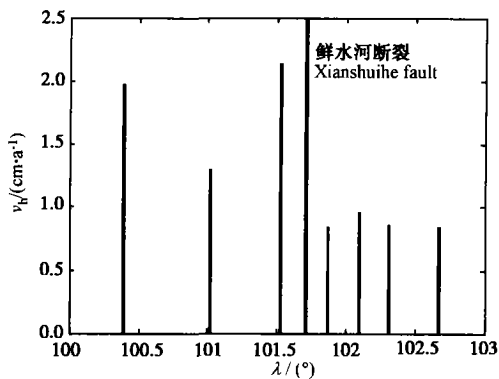


图 3 沿鲜水河断裂带垂直剖面水平速度 v_h 变化

Fig. 3 Horizontal velocity v_h profile along Xianshuihe fault

(3) 块体具有不同的运动方向,菱形块体自西

北往东南的运动方向由近 EE 向(92.8°)转变为 SE 向(130.5°),最后是 SSE 向(161°~168°),印支块体为 SSW 向(196.6°),呈明显的顺时针旋转运动,与陈智梁等^[4]得到涡旋式运动结果一致.而菱形块体以外的龙门山块体、川东北块体及滇东块体的运动方向分别为 125.7°、128.1°和 134.8°,方向基本一致,但与相邻块体的运动方向相差很大,综合(1)和(2)的结果,一方面说明鲜水河断裂、安宁河断裂、小江断裂及红河断裂不仅对菱形块体的运动有吸收作用,而且改变了块体的运动方向;另一方面揭示了菱形块体以差异运动断裂带为边界,促成了块体内部的分段性及同一断裂的分段性.

4.1 主要活动块体运动特征

4.1.1 藏东块体东

该块体处于藏东块体与菱形块体的连接处,构造形变单一,块体的优势运动以东西向为主(N93°E),运动速度为 14.3mm/a,运动方向与北西向为主的构造带垂直,该块体受挤压为主.而藏东块体内的主要构造应力场为近南北向^[14],所以将该块体定义为广义的菱形块体的一部分也是合理的^[21].

4.1.2 川西块体

川西块体西界为金沙江断裂带,东南界为鲜水河和安宁河断裂带,块体北部和南部运动速度分别为 15.1mm/a 和 15.0mm/a,但运动的优势方向为 N130.5°E 和 N162°E,显示出块体内部大角度的旋转运动特点,这与块体内部弧形构造发育有关,南部块体近南北向的运动优势方向与该区 1996 年丽江 7.0 地震的破裂带方向一致.

4.1.3 滇中块体

该块体是由丽江—小金河断裂、红河断裂和则木河—小江断裂带所围限的区域,块体内以南北构造带为主,水平形变优势方向为 165.5°N~168°E,滇中块体南北两个次级块体的运动速度分别为 14.1mm/a 和 11.5mm/a,显示出川滇块体的旋转运动在滇中块体南部受到了明显抑制,而该块体内存在的书斜式(domino style)旋转运动及逆冲活动,交替变换的局部隆起和沉降是主要的吸收和屏蔽机制^[14].

4.1.4 滇东块体

川滇菱形块体的顺时针旋转运动在经过小江断裂带到达滇东块体时,运动速度衰减了 29%,处于华南构造区的滇东块体由于没有受到青藏高原侧东向滑移变形的影响,运动速度为 8.2mm/a,与武汉(8.1mm/a)和上海(8.1mm/a)的运动速度相当,表明滇东块体的运动是稳定的.

4.1.5 印支块体

由于印支块体内构造复杂,既有南北向的断裂带,又有北东向的活动断裂,虽然整个块体的优势运动方向为 $S16.5^{\circ}W$,但块体上 GPS 点位的运动方向的离散性很大,不确定性达到 59° ,由于该区域靠近边境, GPS 点位分布不均,有待进一步研究。

4.1.6 龙门山块体

作为昆仑地块东部的一部分,龙门山块体的优势运动速度和方向分别为 8.49mm/a 和 $N130^{\circ}S$ 。块体运动速度由川西块体到龙门山块体衰减了 42% ,造成鲜水河断裂带频繁而强烈的地震活动。

4.2 运动差异分析

由 GPS 和地质资料推算的各个主要断裂带的运动速度存在部分差异(表 2),其中,两者推算的鲜水河、龙门山、则木河与丽江—小金河断裂带的运动速度基本一致,安宁河断裂带的运动速度比地质结果大一倍,表明该断裂带的现今地壳运动处于活跃期,而小江断裂带的速度比地质结果小很多,吕弋培等^[22]根据 1980~2002 年期间 22 年的跨断层测量资料推算小江断裂的水平运动速度仅为 0.1mm/a ,说明小江断裂带的现今地壳运动较平静,青藏高原侧向滑移变形在经过川滇块体的一系列转化和吸收后,基本上在滇中块体终止^[14],所以通过小江断裂带向东传递到滇东块体和华南块体的变形量很小。上述三种方法揭示的断层运动速度存在较大差异的原因也包括:GPS 和跨断层观测反映的是地壳的现今运动特征,GPS 的结果以活动块体为对象,跨断层观测以局部的观测点位为数据源,两者都受点位分布密度及观测周期等因素的影响;而地质资料反映了断层的长期运动速度,且断层突然错动(如地震)引起的位移,在断层运动速度确定中占主要成分。同时,由于欧拉矢量法是基于块体刚性运动的假设,而川滇地区断层错综复杂,次级块体内仍有变形,所以不排除欧拉矢量的 GPS 结果有局部的放大作用。

根据水平运动速度,基于连续变形假设,采用三角形法,计算了区域应变场特征值:主应变率、剪切应变率、主应变方向等,图 4 为 1998~2002 年间川滇地区的最大剪应变分布。图 4 表明,川滇地区 1998~2002 年间的最大剪应变处于 $10^{-7}/\text{a}$ 量级,说明整个地区受到外部力驱动影响明显;该区存在两个明显的应变集中区,分别是曲江断裂带位于楚雄与大姚之间的区域及龙门山断裂带位于绵竹与南坝之间的区域,另外在云南的新平及四川的石棉及雅江附近也出现了应变集中区。该区的面膨胀率(图 5)显

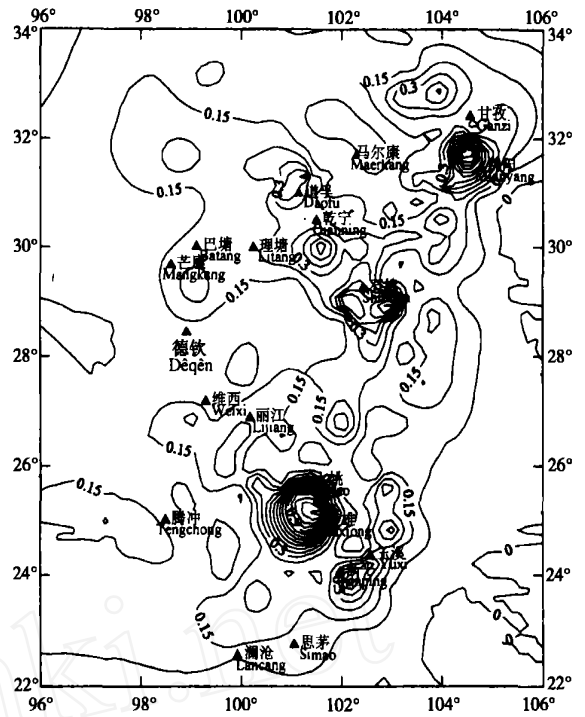


图 4 川滇地区最大剪应变场(1998~2002 年)
(单位: $10^{-6}/\text{a}$)

Fig. 4 The distribution of maximum shear strain rate in Yunnan and Sichuan area (1998~2002) (unit: $10^{-6}/\text{a}$)

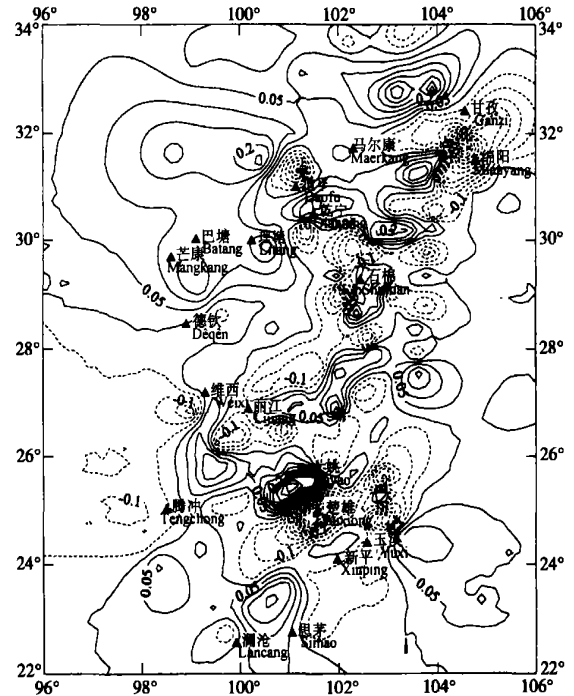


图 5 川滇地区面膨胀率等值线(1998~2002 年)
(单位: $10^{-6}/\text{a}$)

实线和虚线分别表示膨胀和压缩。

Fig. 5 The contour map of surface dilation rate in Yunnan and Sichuan area (1998~2002) (unit: $10^{-6}/\text{a}$)
Real line means dilation and dash line means compression.

示,整个地区以压缩为主,面压缩率平均为 $-1.0 \times 10^{-7}/a$,绵竹与南坝之间及楚雄附近出现最大的面压缩率 ($-7.0 \sim -6.0 \times 10^{-7}/a$),而大姚附近最大的面膨胀率为 $5 \times 10^{-7}/a$,其中楚雄一带的压缩与大姚一带的拉张呈明显的对称状态.根据该地区同期的地震目录(图4)发现,2000年1月15日的姚安 $M_s 6.7$ 地震、2001年7月10日的楚雄 $M_s 5.6$ 地震、1999年9月14日绵竹 $M_s 5.4$ 地震及1999年11月30日安县 $M_s 5.4$ 地震均发生在应变集中区或边缘,而其他地震大多并非发生在应变集中区,这可能是由于GPS点位分布不均(如金沙江地区及菱形块体周边地区的GPS点位稀疏)及川滇地区复杂的构造活动造成的.在石棉和新平一带出现的应变集中区可能是发生中强地震的危险地区.

5 结论与讨论

受青藏高原地壳物质的东向移动、阿萨姆顶点楔入及缅甸微板块的共同影响,使川滇地区成为现今地壳运动最活跃的地区之一^[14],而该地区活动断裂的特殊构造特性,又使得该地区的地壳运动表现为复杂多变的特征,1998~2002年间的GPS结果表明,川滇地区的地壳运动具有北强南弱、西强东弱、以菱形块体为主顺时针旋转的特征,菱形块体外各个块体运动速度的大幅衰减,表明鲜水河断裂、安宁河—则木河断裂、小江断裂及红河断裂带对活动块体的运动和旋转起到明显的吸收作用,对青藏高原东侧物质扩散具有调节作用.

将川滇地区划分为9个次级块体,并根据GPS结果计算各个块体欧拉旋转矢量和断层的运动速度,结果表明各个块体具有不同的运动特征,证明对块体的划分有一定的合理性;GPS结果与地质结果的差异也许反映了该地区活动断裂的现今地壳运动.

地质调查结果表明,NE向的丽江—小金河断裂带对于青藏高原物质的侧东向挤出具有调节及吸收作用^[11,23];向宏发^[23]认为川滇菱形块体中的上地壳物质的南向运动在经过丽江—小金河断裂带时水平滑动速度约消减了1/3,而GPS结果显示该断裂带南北两侧的川西块体南段与滇中块体北段的水平运动速度分别为 $15.0\text{mm}/a$ 和 $14.1\text{mm}/a$,速度差为 $0.9\text{mm}/a$;衰减了6%,同时,跨断层地壳形变观测的平均运动速度差为 $1.0\text{mm}/a$,地震矩张量计算的地壳平均运动速度差是 $1.4\text{mm}/a$ ^[19,21],这表明在

菱形块体整体运动加强的情况下,丽江—小金河断裂带的近期地壳活动相对减弱,一方面,1998~1999年间该断裂带宁蒭附近发生的一系列中强地震可能释放了大量应变,另一方面,由于丽江—小金河断裂的宽度可能为百余公里^[22],而本文的块体是以“线条”划分的,可能“掩盖”了该断裂带的屏蔽作用.

川滇菱形块体在青藏高原强烈的构造活动和华南块体刚性运动的共同作用下,以压缩应变为主,在应变集中区及边缘具有发生地震的活动背景,四川石棉和云南新平一带出现的应变集中区可能是发生中强地震的危险区.

参考文献

- [1] 阚荣举,张四昌,宴风桐.我国西南地区现代构造应力场与现今构造活动特征的探讨.地球物理学报,1977,20(2):96~107
Kan R J, Zhang S C, Yan F T. Study on the current tectonic stress field and the characteristics of tectonic activity in Southwest China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1977, 20(2): 96~107
- [2] Molnar P, Helene L C. Fault plane solution of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophys. J. Int.*, 1989, 99: 123~153
- [3] Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(B3): 2787~2838
- [4] 陈智梁,张选阳,沈凤等.中国西南地区地壳运动的GPS监测.科学通报,1999,44(8):851~854
Chen Z L, Zhang X Y, Shen F, et al. GPS measurements in Southwest region of China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1999, 44(8): 851~854
- [5] 王琪,张培震, Freymuller J T等.中国大陆现今地壳运动与构造变形.中国科学(D辑),2001,31(7):529~536
Wang Q, Zhang P Z, Freymuller J T, et al. Crustal movement and tectonic deformation of continental China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2001, 31(7): 529~536
- [6] Wang Q, Zhang P Z, Freymuller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 2001, 294(5542): 574~577
- [7] 申重阳,王琪,吴云等.川滇菱形块体主要边界运动模型的GPS数据反演分析.地球物理学报,2002,45(3):352~361
Shen C Y, Wang Q, Wu Y, et al. GPS inversion of kinematic model of the main boundaries of the rhombus block in Sichuan and Yunnan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(3): 352~361
- [8] 李坪.鲜水河—小江断裂带.北京:地震出版社,1993
Li P. Xianshuihe-Xiaojiang Fault (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993
- [9] 李天绍,杜其方,游泽李等.鲜水河活动断裂带及强震危险性评估.成都:成都地图出版社,1997
Li T S, Du Q F, You Z L, et al. The active Xianshuihe fault zone

- and seismic risk assessment (in Chinese). Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1997
- [10] Allen C R, Gillespie A R, Han Y S, et al. Red River and associated faults, Yunnan Province. China: Quaternary Geology, Slip Rate and Seismic Hazard. *Geol. Soc. America Bull.*, 1984, **95**: 686 ~ 700
- [11] 徐锡伟,程国良,于贵华等. 川滇菱形块体顺时针转动的构造学与古地磁学证据. *地震地质*, 2003, **25**(1): 61 ~ 70
Xu X W, Cheng G L, Yu G H, et al. Tectonic and paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of the Sichuan-Yunnan rhombic block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, **25**(1): 61 ~ 70
- [12] 王琪. 中国大陆现今地壳运动研究. *地震学报*, 2003, **25**(5): 541 ~ 547
Wang Q. Current crustal movement in China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(5): 541 ~ 547
- [13] 牛之俊,马宗晋,陈鑫连等. 中国地壳运动观测网络. *大地测量与地球动力学*, 2002, **22**(3): 1 ~ 7
Niu Z J, Ma Z J, Chen X L, et al. Crustal movement observation network of China. *J. Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2002, **22**(3): 1 ~ 7
- [14] 宋方敏,汪一鹏,俞维贤等. 小江活动断裂带. 北京:地震出版社, 1998
Song F M, Wang Y P, Yu W X, et al. The active Xiaojiang Fault Zone (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1998
- [15] 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集. 北京:地图出版社, 1989
Ma X Y, Chief ed. Lithospheres Dynamics Atlas of China (in Chinese). Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989
- [16] 李国和,王思敬,尚彦军等. 川滇交界地区地壳构造及现代地壳活动模式. *地质力学学报*, 2000, **6**(2): 82 ~ 91
Li G H, Wang S J, Shang Y J, et al. The crustal structure and mode of crustal movement in the Sichuan-Yunnan region. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2000, **6**(2): 82 ~ 91
- [17] 丁国瑜. 活动断层分段原则、方法及应用. 北京:地震出版社, 1993
Ding G Y. The Principle, Strategy and Application for Active Faults (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993
- [18] 陈智梁,沈凤,刘宇平等. 青藏高原东部地壳运动的 GPS 测量. *中国地质*, 1998, **5**(252): 32 ~ 35
Chen Z L, Shen F, Liu Y P, et al. GPS measurements of crustal movements in eastern Tibet. *Geology in China* (in Chinese), 1998, **5**(252): 32 ~ 35
- [19] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估. 北京:地震出版社, 1995
Wen X Z. Quantitative Assessment of Seismic Potential on Active Fault (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1995
- [20] 唐荣昌,韩渭宾. 四川活动断裂与地震. 北京:地震出版社, 1993
Tang R C, Han W B. Active Faults and Earthquakes in Sichuan (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993
- [21] 程万正,刁桂苓,吕弋培等. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式. *地震地质*, 2003, **25**(1): 71 ~ 87
Chen W Z, Diao G L, Lu Y P, et al. Focal mechanisms, displacement rate and mode of motion of the Sichuan-Yunnan block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, **25**(1): 71 ~ 87
- [22] 吕弋培,廖华,苏琴等. 川滇菱形块体边界的现今地壳形变. *中国地震*, 2002, **18**(1): 28 ~ 37
Lu Y P, Liao H, Su Q, et al. The recent crustal deformation in Sichuan-Yunnan rhombic block boundary. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2002, **18**(1): 28 ~ 37
- [23] 向宏发,徐锡伟,虢顺民等. 丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义——陆内活动地块横向构造的屏蔽作用. *地震地质*, 2002, **24**(2): 188 ~ 198
Xiang H F, Xu X W, Guo S M, et al. Sinistral thrusting along the Lijiang-Xiaojinhe fault since Quaternary and its geologic-tectonic significance—Shielding effect of transverse structure of intra-continental active block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2002, **24**(2): 188 ~ 198