

川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源*

徐锡伟^① 闻学泽^② 郑荣章^① 马文涛^① 宋方敏^① 于贵华^①

(^① 中国地震局地质研究所, 北京 100029; ^② 四川省地震局, 成都 610041)

摘要 基于“活动块体”的基本概念, 综合历史地表破裂型地震的空间分布、主干活动断裂和次级活动断裂的展布特征等, 川滇地区可划分出 4 个一级块体: 马尔康块体(I)、川滇菱形块体(II)、保山-普洱块体(III)和密支那-西盟块体(IV)等; 受次级北东向断裂的切割, 川滇菱形块体(II)可进一步划分为川西北(II₁)和滇中(II₂) 2 个次级块体, 保山-普洱块体(III)包括保山、景谷和勐腊等 3 个次级块体(III₁, III₂, III₃). 通过断错地貌学的定量研究, 厘定了川滇地区各级块体主干边界活动断裂的基本类型和长期滑动速率值; 运用矢量分析的方法确定了块体的运动状态, 并讨论了变形协调性问题, 指出川滇地区各级块体运动是平移、转动和隆升等 3 种基本运动的复合或叠加. 其中马尔康块体、川西北和滇中两个次级块体南东向或南南东向平移速率 1~5 mm/a, 顺时针转动角速率 1.4~4°/Ma, 隆升速率 1 mm/a 左右; 保山-普洱和密支那-西盟两块体也发生过大规模的顺时针转动. 它们是印度板块与欧亚板块碰撞、印度板块北移引起板块边缘或内部变形局部化和差异运动的应变响应. 由于存在横向活动逆断裂带对东向或南东向平移分量的吸收和转换, 青藏高原物质的向东逃逸量或挤出量是有限的, 为“叠瓦状逆冲转换-有限挤出模型”.

关键词 川滇地区 活动断裂 活动块体 块体转动 构造变动

“活动块体”是脆性地壳在最新构造变动期间变形局部化的产物, 指受晚第四纪活动构造切割、围限, 至今仍活动着的构造单元, 具有运动的整体性、边界类型的多样性、多种构造变形的相互协调性等基本特征, 与现今地表破裂型地震的发生密切相关^[1-6]. 川滇地区位于青藏高原东南部, 第四纪时期以大规模水平剪切变形为主, 兼有强烈隆升运动; 一系列规模不等、力学性质不同的活动断裂(带), 将川滇地区切割成不同级别的活动块体, 控制着川滇地区地震的不均匀空间分布^[7-15], 是建立青藏高原物质向东逃逸-滑移线场理论的关键地段^[16].

本文在对高分辨率数字卫星影像处理与解译、野外实地调查、断错地貌面(线)高精度测量、测年等工作基础上, 通过川滇地区活动块体的划分、块边和块内活动断裂定量化研究, 确定了川滇地区二级活动块体的边界类型和运动学参数, 讨论了各级块体最新构造变形的协调性和动力来源, 它们是深刻理解活动块体运动状态、地震构造横向差异、地表破裂型地震时空迁移等科学问题十分重要的前提与基础.

2002-05-20 收稿, 2002-09-08 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1998040701)资助

1 活动块体的划分及其物理性状

1.1 活动块体的划分

活动块体的运动是通过不同类型边界活动构造带,特别是活动断裂的有震或无震破裂和摩擦滑动及其附近较窄范围内的柔塑性变形实现的,块体边界活动构造带对历史、现今和未来破坏性地震具有明显的空间限制作用^[1,6]。可见,具有一定规模的空间尺度和整体一致的运动学特征,且内部变形较小,地震活动性相对较弱,周围被运动学上相互协调的不同类型活动断裂(带)或破坏性地震线(带)围限的构造域,可作为一个独立的活动块体。

综合历史地表破裂型地震的空间分布、主干活动断裂和次级活动断裂的空间展布以及滇西南地区二十世纪发生过 7 次 $M \geq 7$ 级地震和 20 次 $6 \leq M < 7$ 级地震的北西向腾冲-澜沧新生断裂^[17]等,可将川滇地区划分为 4 个一级块体:马尔康块体(I)、川滇菱形块体(II)、保山-普洱块体(III)和密支那-西盟块体(IV)等。受次级北东向断裂的切割,川滇菱形块体(II)可进一步划分为川西北(II₁)和滇中(II₂) 2 个次级块体,保山-普洱块体(III)包括保山、景谷和勐腊等 3 个次级块体(III₁, III₂, III₃)(图 1)。

1.2 活动块体的物理性状

川滇及其邻近地区已有大地热流资料表明,活动块体本身地表热流值相对较低,其中马尔康块体内部阿坝附近热流值仅 36.0 mW/m^2 ,小江断裂带以东华南地块和红河断裂带以西保山-普洱和密支那-西盟两块体热流值为 57.1 mW/m^2 ;滇中次级块体热流值分布极不均匀,近南北向普陀河断裂和元谋断裂沿线较高,平均值可达 75 mW/m^2 ,而其他地段仅 43 mW/m^2 。块边活动断裂带是地表高热流点、带所在地,如红河断裂带北段达 97 mW/m^2 ,南段楚雄-建水断裂带 78 mW/m^2 ;丽江-小金河断裂带 $71 \sim 90 \text{ mW/m}^2$ ^[18-20]。高热流值标志着上地壳处于相对易变形的弱强度状态,低热流值表明地壳处于较冷的刚性高强度状态。与此相对应,一、二级块体边界活动断裂控制了绝大部分 $M \geq 7$ 级地震的震源位置,而块体内部次级活动断裂是 $6 \leq M \leq 7$ 级地震的震源所在地。

2 块体运动学特征与变形协调性

2.1 边界断裂的基本类型

按块体边界断裂发育阶段或断裂力学性质可分为先存活动断裂和新生断裂两大类。川滇地区各级块体绝大部分边界断裂属先存活动断裂(图 1)。新生断裂特指保山-普洱(III)与密支那-西盟(IV)两块体之间北西向腾冲-澜沧新生断裂带。先存活动断裂按运动学性质可细分为逆倾滑型、逆走滑型、走滑型、正走滑型和正倾滑型 5 类。马尔康块体东南边界的龙门山断裂带和川西北次级块体西界的金沙江断裂带等是典型的逆倾滑型边界断裂;川西北次级块体北界甘孜-玉树断裂带、川西北与滇中两次级块体之间的丽江-小金河断裂带、滇中次级块体南界的楚雄-建水断裂带属逆走滑型边界断裂;鲜水河断裂带、安宁河断裂带、龙陵-瑞丽断裂和南汀河断裂等属走滑型边界断裂;则木河断裂带、小江断裂带、红河断裂带北段属正走滑型边界断裂;而正倾滑型边界断裂仅局限在滇中次级块体的西北角。

2.2 边界活动断裂的滑动习性

块体边界活动断裂的滑动习性是活动块体运动状态的综合表现,是讨论活动块体边界变

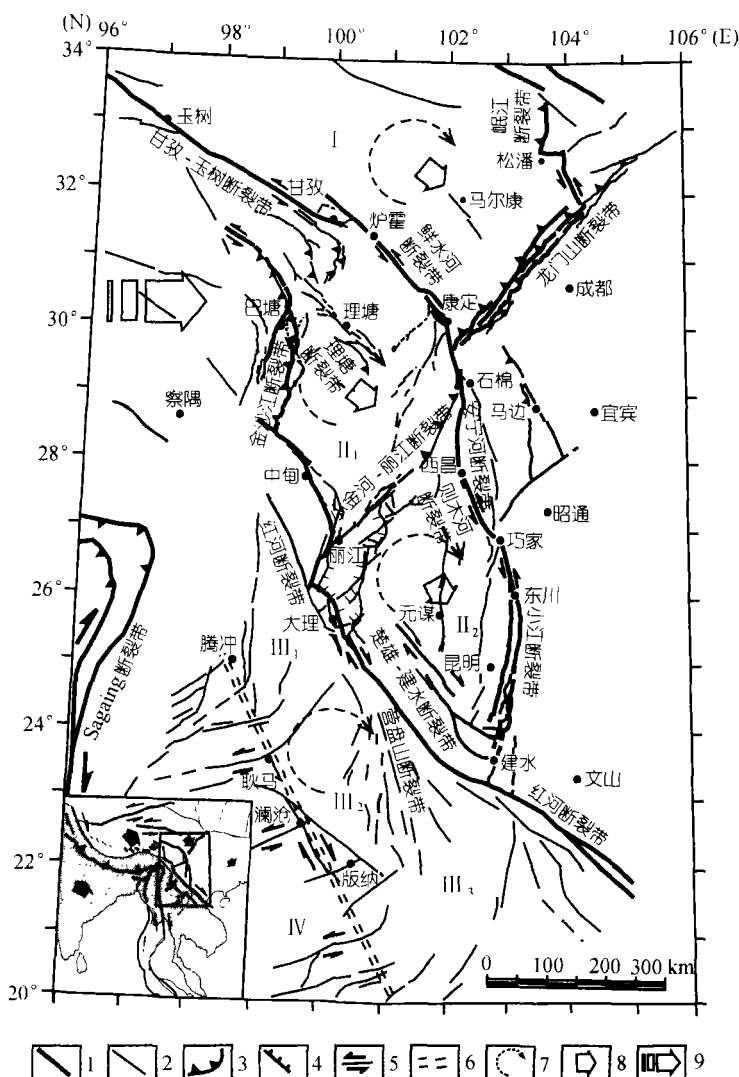


图1 川滇地区活动断裂分布与活动块体划分图

1. 主干活动断裂; 2. 次级活动断裂; 3. 逆断裂; 4. 正断裂; 5. 走滑断裂; 6. 新生断裂; 7. 块体转动方向; 8. 块体平移方向; 9. 块体运动力源方向; I 示马尔康块体; II 示川滇菱形块体, 可进一步划分为(II₁)川西北和(II₂)滇中 2 个次级块体; III 示保山-普洱块体, 包括(III₁, III₂, III₃)保山、景谷和勐腊 3 个次级块体和 IV 密支那-西盟块体等

形协调性的前提。作者依托航卫片处理与野外核实、全站仪高精度测量相结合的技术方法, 对甘孜-玉树、鲜水河、安宁河、大凉山、则木河、丽江-小金河等边界活动断裂带和块体内部理塘断裂带等典型断错地貌进行重点调查与测量, 厘定川滇地区主干活动断裂的全新世滑动速率(表 1)。

2.2.1 甘孜-玉树断裂带 属川西北次级块体北部边界断裂的西段, 东南起自四川甘孜, 向北西经马尼干戈、洛须(邓科), 穿越金沙江至青海玉树, 北西向延伸到青藏高原腹地的玛尔盖查卡湖北缘, 甘孜至玉树间长约 270 km。断裂沿线各种断错地貌发育, 且保存完好, 显示出

表 1 川滇地区主要活动断裂全新世滑动速率一览表^{a)}

序号	活动断裂名称	走向	滑动性质	水平速率/mm · a ⁻¹	垂直速率/mm · a ⁻¹	参考文献
1	甘孜-玉树断裂带	N40° W	LL + R	14 ± 3	1.1 ± 0.4	本文
2	鲜水河断裂带	N40° W	LL	14 ± 2		本文
	西北段(炉霍断裂)	N40° W	LL	10 ~ 20		[21]
	南东段(磨西断裂)	N20° W	LL + R	9.6 ± 1.7	3.2 ± 0.7	本文
				10 ± 2		[22]
3	安宁河断裂带	NS	LL	6.5 ± 1		本文
4	大凉山断裂带	NS	LL	3.3 ± 0.7		本文
	则木河断裂带	N25° W	LL + N	6.4 ± 0.6	?	本文
				4.9	0.6	[23]
6	小江断裂带	NS	LL + N	10 ± 2		[24]
	西支断裂			7 ± 1	0.8 ± 0.2	[24]
	东支断裂			4.8 ± 0.5	0.7 ± 0.2	[24]
7	曲江断裂	N60° W	RL + R	3.5	?	本文
8	红河断裂带	N50° W	RL			
	南段	N70° W	RL + R	3.5 ± 1.5	?	[25]
	北段	N45° W	RL + N	3.3	0.8	[26]
9	玉龙雪山东麓断裂	NS	LL + R	2.0 ± 0.5	?	本文
10	德钦-中甸-大具断裂	N40° W	RL	5 ± 1.0		[27]
11	金沙江断裂带(弧形)	NS ~ NW	R + RL	5?	?	[28]
12	丽江-小金河断裂带	N48° E	LL + R	3.8 ± 0.7	0.6 ± 0.1	本文
13	腾冲-澜沧新生断裂带	N30° W	RL	5.3 ± 1.1		本文
14	南汀河断裂	NE	RL	2.7 ± ?		[29]
15	岷江断裂	NS	LL + R	1	0.45 ± 0.1	[30]
16	龙门山断裂带	N45° E	R		1	[31]
17	东昆仑断裂带东段	N45° W	LL	9 ± 3		[32]
18	理塘断裂带	N45° W	LL	4 ± 1		本文

a) 表内 LL: 左旋走滑; RL: 右旋走滑; R: 逆倾滑; N: 正断倾滑

强烈地左旋走滑运动, 已报道的晚第四纪左旋滑动速率为 7 mm/a^[31], 但详细调查表明它具有更高的平均滑动速率。

在甘孜-玉树断裂中段马尼干戈北西的日阿附近, 玉曲河支流汪欠河 T3/T2 阶地坎被左旋错动, 水平位移量达(95 ± 10) m, 垂直(逆)位移量 9 m(北东盘相对下降)(图 2); 在马尼干戈南东的错阿附近, 玉曲河另一支流错通柯河 T3/T2 阶地坎也被左旋错动, 水平位移量(92 ± 6) m, 垂直(逆)位移量 4 m。马尼干戈附近玉曲河主要支流 T3 阶地上部堆积物样品经测定其热释光(TL)年龄距今(11.12 ± 0.93) ka; T2 阶地面 TL 年龄距今(6.62 ± 0.52) ka, 接近 T3/T2 阶地坎下切形成年代, 据此可得甘孜-玉树中段全新世左旋滑动速率为(13.4 ± 2) mm/a, 垂直滑动速率为(1.1 ± 0.4) mm/a。

在东南段的甘孜俄中附近, 雅砻江 T3 阶地地面上一冲沟床左旋错动了(34 ± 6) m, 由于该冲沟在 TL 年龄为距今(2.37 ± 0.19) ka 的 T2 阶地地面上也存在, 表明冲沟初始错动年代应与 T2 阶地地面的年龄相当, 则东南段左旋滑动速率为(14.3 ± 3) mm/a。

因此, 甘孜-玉树断裂带全新世左旋滑动速率可达(14 ± 3) mm/a, 垂直(逆)滑动速率(1.1 ± 0.4) mm/a。

2.2.2 鲜水河断裂带 鲜水河断裂带走向 N40° W, 略呈向北东凸出的弧形弯曲, 全长约 400 km, 与甘孜-玉树断裂带左阶羽列, 在阶列区形成宽 22~35 km 的甘孜拉分区。鲜水河断裂

北西段从甘孜延伸到八美附近, 由结构简单的单一断裂构成, 发育着大量左旋断错地貌景观和近代大地震地表破裂遗迹. 前人对其晚第四纪左旋滑动速率作过估算, 但不确定性较大(表1). 我们最近的野外调查获得有利于进一步限定滑动速率取值范围的证据.

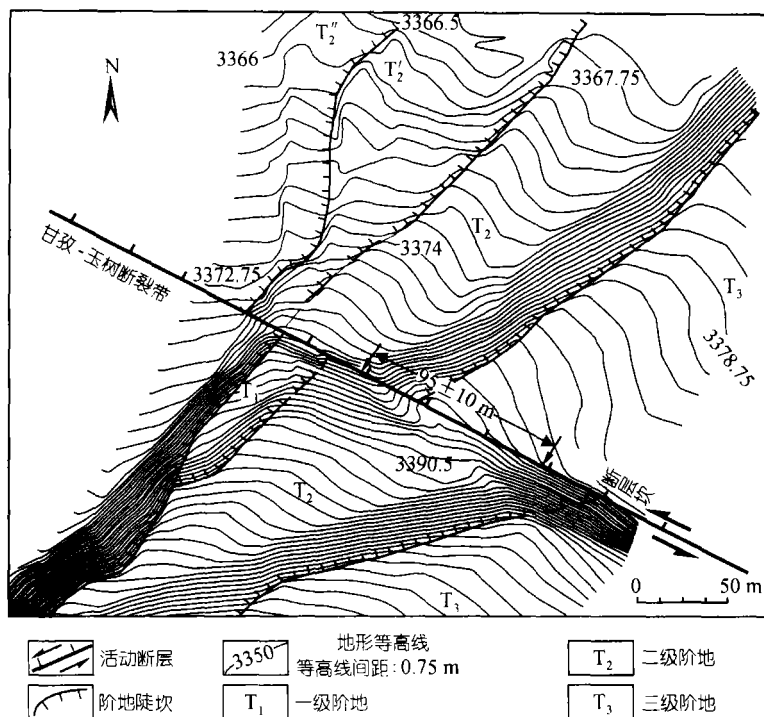


图2 甘孜-玉树断裂带日阿河流阶地断错地貌图(全站仪实测)

在炉霍北西故里村附近, 鲜水河断裂左旋错动一大冲沟 T2, T3 和 T4 之间的阶地坎, 左旋位移量分别为 (55 ± 10) m (T2/T3) 和 (110 ± 15) m (T3/T4), 其中 T2 和 T3 两级阶地堆积物 TL 年龄分别距今 (3.76 ± 0.29) ka 和 (7.32 ± 0.56) ka. 在道孚麻孜村附近, 鲜水河南岸一支流河谷被左旋位移 (400 ± 50) m, 下游段成废弃干河床, 其底部堆积物样品 TL 年龄距今 (27.24 ± 2.12) ka. 在道孚南东松林口, T2/T3 阶地坎的左旋位移量达 (170.5 ± 15) m, 而 T2 阶地堆积物顶部样品 TL 年龄距今 (13.18 ± 1.07) ka. 使用以上 3 个地点多个地貌断错位移量及相关堆积物样品的年龄值, 将鲜水河断裂带北西段距今 27 ka 以来的平均左旋滑动速率限定为 (14 ± 2) mm/a.

鲜水河断裂带南东段位于康定雪门坎以南, 称磨西断裂, 走向 $N25^\circ W$. 在磨西盆地北部, 堆积物样品 ^{14}C 树轮校正年龄(calibrated age)距今为 (5215 ± 125) a 的一阶地面上, 一废弃河道的左旋位移量 (46 ± 8) m, 断坎高约 8 m. 稍南, 磨西断裂斜切磨西盆地堆积面(沉积物样品 ^{14}C 树轮校正年龄距今为 (2925 ± 85) a) 上已废弃的古河道, 水平和垂直位移量分别为 (28 ± 5) m 和 (9.5 ± 2) m (图3). 从上述各个位移量和年龄数据可得, 鲜水河断裂带南段的平均左旋滑动速率为 (9.6 ± 1.7) mm/a, 垂直滑动速率为 (3.2 ± 0.7) mm/a.

因此, 鲜水河断裂带北西段的左旋滑动速率可达 14 mm/a, 南段磨西断裂由于走向向北偏转约 15° , 逐渐与近南北向安宁河断裂带过渡, 鲜水河断裂带南西盘南东向水平滑移受阻, 左

旋滑动速率减少到 10 mm/a, 剩余部分转换成以贡嘎山为中心的强烈隆升, 隆升速率约 3.2 mm/a.

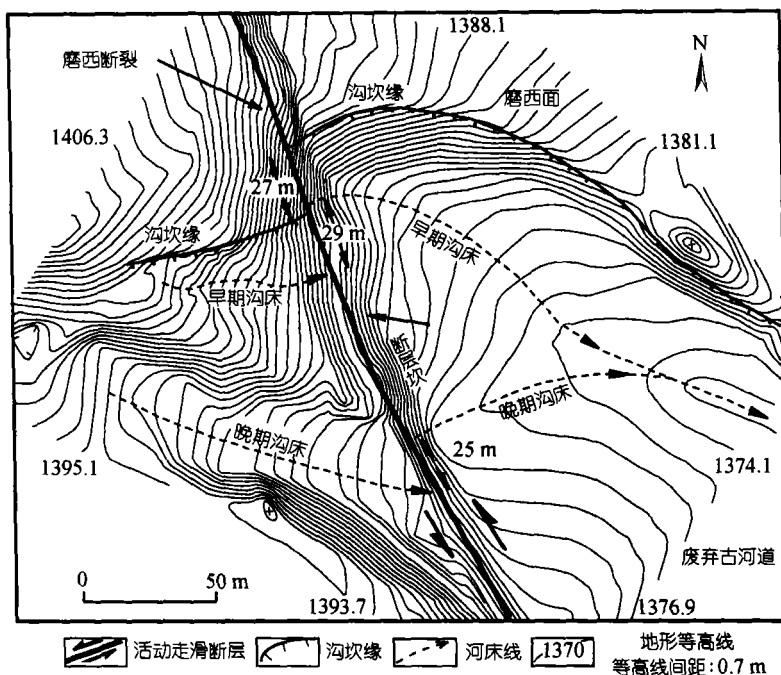


图 3 鲜水河断裂带南段磨西盆地新兴镇古河道断错地貌图(全站仪实测)

2.2.3 安宁河断裂带与大凉山断裂带 滇中次级块体东边界北段由近北向安宁河断裂带和大凉山断裂带组成(图 1). 两断裂在四川石棉附近共同交汇于鲜水河断裂带南端, 向南两者首先逐渐分开, 后又在云南巧家一带逐渐汇合, 与小江断裂带相连.

安宁河断裂带以左旋走滑为主, 伴有一定的正倾滑分量. 据报道距今 26.5ka 以来的左旋滑动速率介于 5.5 ~ 8.5 mm/a 之间^[33]. 我们的详细调查发现, 冕宁南林里村附近在安宁河 T3 阶地基础上发育的冲沟被主断裂左旋错动(180 ± 30) m, 其中 T2, T3 两级阶地顶部堆积物 TL 年龄分别距今(25.35 ± 0.41) ka 和(31 ± 1.9) ka, 可得安宁河断裂南段的左旋滑动速率(6.5 ± 1) mm/a.

大凉山断裂带位于大凉山腹地, 走向 $330^\circ \sim 360^\circ$, 由安顺场-新场断裂、石棉-海棠-越西断裂、普雄-竹核断裂、拖都-布拖断裂、吉夫拉拉-交际河断裂等斜列而成. 在拖都以西, 拖都-布拖断裂左旋切割了多条冲沟的 T1 阶地, 实测左旋位移量分别为(60 ± 5), (40 ± 4), (30 ± 4) m; 而阿候八呷附近 T1 阶地中下部堆积物样品 ^{14}C 树轮校正年龄距今为(14.74 ± 0.15) ka, 由此计算得到大凉山断裂带的左旋滑动速率平均为(3.3 ± 0.3) mm/a.

因此, 滇中次级块体东边界北段的左旋滑动速率应该是安宁河断裂带与大凉山断裂带的合速率, 约为 9~10 mm/a.

2.2.4 则木河断裂带 展布于西昌与巧家之间, 长约 110 km, 走向 $N25^\circ W$, 以左旋走滑为主, 在西昌至普格之间还伴有北东盘相对下降的正断倾滑分量. 在断裂带中部普格附近, 黑水河若干支流在穿越断裂处被左旋错断 700~1000 m, 形成断头的弃沟地貌. 在西昌与普格之间

侧路路布村南山前洪积扇被左旋错动(85 ± 5) m, 洪积扇顶部堆积物 TL 年龄(13.29 ± 1.04) ka, 可得则木河断裂带的左旋滑动速率为(6.4 ± 0.6) mm/a.

2.2.5 丽江-小金河断裂带 丽江-小金河断裂是川滇菱形块体内部在中新生代龙门山-锦屏山-玉龙雪山推覆构造带南西段基础上形成的一条北东向活动断裂带, 南西起自红河断裂带北段的剑川盆地, 向北东经担读、丽江、八二桥、木里等地, 东止于安宁河断裂带的冕宁以北, 由多条斜列的次级断层组成, 整体走向 $N45^\circ \sim 50^\circ E$, 倾向北西, 倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$. 野外考察表明, 丽江-小金河断裂沿线发育着各种断错地貌, 晚第四纪以左旋走滑为主, 兼有垂直(逆)分量.

在丽江-小金河断裂带西南段南溪担读村北东山前地带, 断裂左旋切割一冲洪积扇(a_1)及其上小冲沟, 其中小冲沟的左旋位移量达(31 ± 4) m(图 4); 在洪积扇顶部褐红色耕作土之下、洪积砾石层之上发育着厚 1 m 左右的黑色泥炭层, 推测为断塞塘堆积, 其中上部样品的 ^{14}C 树轮校正年龄距今为(9910 ± 210) a, 略早于或等于被错动小冲沟的下切年代, 可得该地点断裂的全新世左旋滑动速率为(3.1 ± 0.4) mm/a.

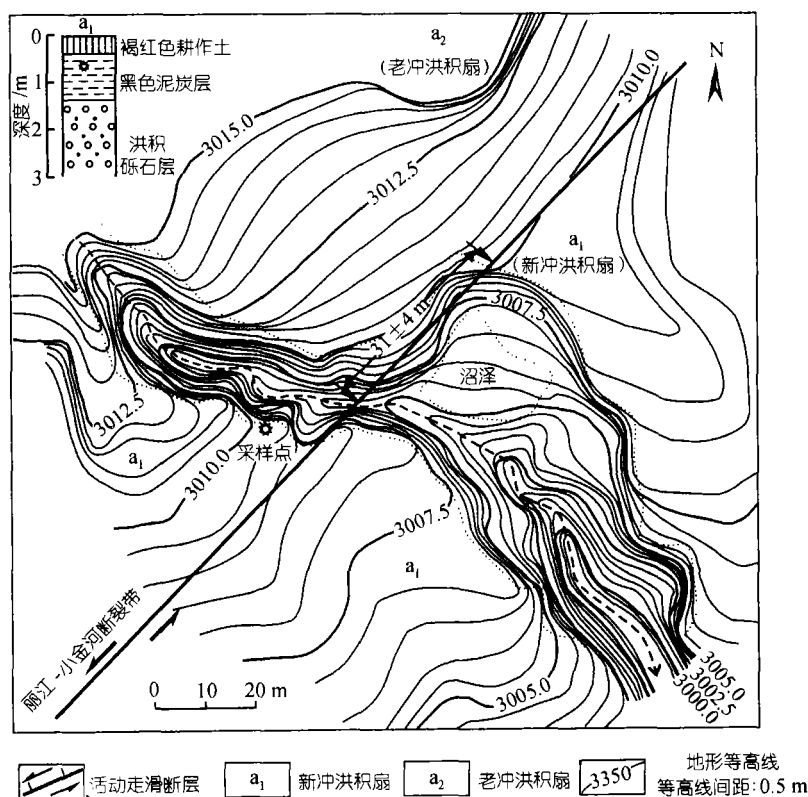


图 4 丽江-小金河断裂带西南段担读村北东冲洪积扇面上小冲沟断错地貌图(全站仪实测)

丽江盆地北东的团山莲花村山前, 一冲沟口的冲洪积扇也被左旋错动, 在扇面上形成高约 1.5 m 的断层陡坎, 冲洪积扇东缘与小冲沟 T1 阶地陡坎($a_2/T1$)的左旋位移量约 8.6 m. 冲洪积扇面顶部厚 1.7 m 紫红色黏土之下, 淡棕色砂砾石层夹含块状木炭的灰黑色黏土薄层, 其木炭样品 ^{14}C 树轮校正年龄距今(2950 ± 115) a; 小冲沟 T1 阶地灰色砾石层内所含木炭样品的 ^{14}C 树轮校正年龄距今(1905 ± 95) a. 由此可得, 莲花村附近左旋滑动速率(4.5 ± 0.2) mm/a, 垂直

(逆)滑动速率(0.65 ± 0.14) mm/a.

因此, 丽江-小金河断裂全新世左旋滑动速率(3.8 ± 0.7) mm/a, 北西盘相对东南盘的抬升(逆)速率(0.65 ± 0.14) mm/a.

2.2.6 理塘断裂带 理塘断裂带属川西北次级块体内部次级活动断裂(图 1), 北西起自金沙江畔, 经曲得、理塘、甲洼, 南至德巫, 由 3 条 50~65 km 长的次级断层斜列而成, 左旋走滑性质. 在理塘县西侧金厂沟口至兵站一带, 众多冲沟和洪积扇被左旋错动, 其中一条长度 4 km 冲沟 T1/T2 阶地坎的左旋位移量(20 ± 4) m, T2 阶地顶部堆积物 TL 年龄距今(6.41 ± 0.51) ka; 在规模相当的金厂沟口从更高一级地貌面下切形成的侵蚀坎, 其左旋位移量(32 ± 5) m. 这些位移和年代数据表明, 理塘断裂带中段的左旋滑动速率为(4 ± 1) mm/a.

2.3 块体运动状态与变形协调性

川滇地区各级块体边界活动断裂带为带有一定倾滑分量的走滑断裂, 表明它们的整体运动包含着平移、转动和隆升等 3 类构造运动. 假定各块体近似刚性, 内部变形很小或没有, 变形局限在边界断裂上, 则块体在垂向上的隆升速率大致等于边界活动断裂的垂直运动分量; 而块体在水平面内的运动(V)为平移(V_h)和转动($\omega \times r$)之矢量和, 可分以下 2 种情况用矢量分析方法确定各块体的运动状态.

情况 1: 块体受近于平行、滑动性质一致的走滑断裂控制(图 5(a)), 相当于在块体两侧边界上施加了一对力偶作用, 则转动角速度 $\omega = (V_{ss}/r)180^\circ/\pi$, 其中 V_{ss} 为块边走滑断裂对块体转动有贡献的走滑速率值大小, r 为两走滑断裂间块体的半宽度($w/2$). 在这种情况下, 块体转动量与控制块体转动的边界断裂位移量是同一种变形的两个不同特征量, 边界断裂的走滑位移量(d)、块体宽度(w)、块体转动角(Φ)、边界断裂与外围区域间的原始夹角(α)存在着如下几何关系^[1]: $d/w = \sin \Phi [\sin \alpha \times \sin(\alpha - \Phi)]$. 这种形式的转动会在块体端角部位上有规律地出现局部挤压与拉张变形效应, 即在朝边界运移的块体端角部位形成挤压变形构造(逆断层、褶皱和挤压隆起), 而在背离边界运移的块体端角部位形成拉张变形构造(正断层、张剪切断层和拉分盆地), 体现出块体转动与边界断裂滑移的变形协调性. 此外, 区域上的右旋剪切变形会引起其内部一组近平行的次级断层发生左旋走滑错动和块体的顺时针转动(图 5(a)), 反之亦然^[1].

情况 2: 块体受近于平行、滑动性质相反、但滑动速率绝对值不等($|V_{s1}| \neq |V_{s2}|$)的走滑断裂控制(图 5(b)), 滑动速率共值部分代表块体的平移运动, 差值部分($|V_{s1}| - |V_{s2}|$)则相当于在块体一侧施加了一集中力作用, 绕垂直轴的转动角速度 $\omega = (|V_{s1}| - |V_{s2}|/2r)180^\circ/\pi$. 值得一提的是, 这一形式的块体运动包含着平移和转动两个分量, 块体的转动量仅与近平行的两条边界断裂位移量或滑动速率的差值有关, 在块体运动前端边界断裂上发生强烈挤压作用, 并带有与滑动速率绝对值较大一侧边界断裂走滑性质一致的走滑分量, 而在块体两侧边界走滑断裂上也会有规律地交替出现局部挤压和拉张变形构造(图 5(b)).

2.3.1 马尔康块体(I) 受北西向东昆仑断裂带东段、近南北向岷江断裂带、北东向龙门山断裂带西南段、北西向鲜水河断裂带和甘孜-玉树断裂带等围限的半封闭块体, 属可可西里-巴颜喀拉地块东端. 已知半宽度 $r = 190$ km, 北西向近于平行的边界走滑断裂左旋走滑性质, 全新世滑动速率 13~14 mm/a, 则依据情况 1 给出的计算公式可得马尔康块体顺时针转动角速率 $\approx 3.9^\circ/\text{Ma}$, 岷江断裂带北段逆倾滑分量是这一转动的端角挤压效应; 而倾向北西的龙门山断裂带挤压逆冲运动意味着马尔康块体向南东 135° 左右的平移和垂向隆升. 已知龙门山断裂

带的地表倾角 $65^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 4 km 之下变缓为 $10^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ^[28], 则垂直隆升速率 1 mm/a 意味着平移速率可达 1~2 mm/a.

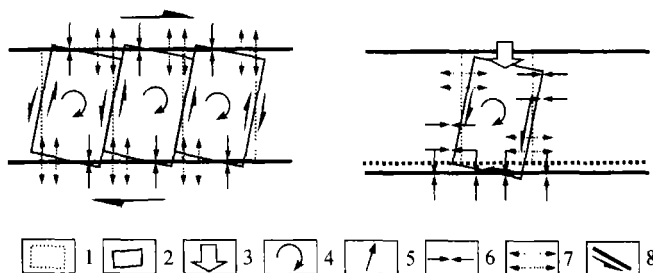


图5 块边断裂滑动方式与块体转动模型示意图

1. 原始块体边界; 2. 转动+平移后块体边界; 3. 平移方向; 4. 转动方向; 5. 边界走滑性质; 6. 局部挤压效应; 7. 局部拉张效应; 8. 块体外围边界带及其运动方向

2.3.2 川西北次级块体(Ⅱ₁) 受北西向甘孜-玉树断裂带、鲜水河断裂带、北东向丽江-小金河断裂带、近南北向玉龙雪山-东麓断裂、金沙江断裂带等围限的区域, 属川滇菱形块体北部次级块体。北西向甘孜-玉树断裂带、鲜水河断裂带、北东向丽江-小金河断裂带和近南北向玉龙雪山-东麓断裂一致连续的左旋走滑运动, 以及西边界近南北向金沙江断裂带和德钦-中甸-大具断裂带右旋走滑运动等表明, 川西北次级块体既存在着向南东 135° 的平移、平移速率约 5 mm/a, 又存在顺时针转动。已知 $r = 185$ km, 速率差值 $|V_{S1}| - |V_{S2}| = 8\sim 9$ mm/a, 则依据情况 2 给出的计算公式可以得到其顺时针转动角速度 $\approx 1.4^{\circ}/\text{Ma}$ 。丽江-小金河断裂逆倾滑运动分量是次级块体存在垂直运动分量的具体表现, 也是次级块体运动前端强烈挤压作用的见证。需要指出的是, 西边界金沙江断裂带由多条向东凸出的弧形逆断层组成, 显示出羌塘地块曾发生过或正经历着东向滑移, 金沙江断裂带除把其一部分平移运动转换为地壳缩短和隆升外, 还把剩余部分平移运动量传递给川西北次级块体, 使后者发生南东向平移和顺时针转动。

2.3.3 滇中次级块体(Ⅱ₂) 受北东向丽江-小金河断裂带、南北向安宁河断裂带、北西向则木河断裂带、南北向小江断裂带和北西向红河断裂带等围限的三角形区域, 内部发育着多条活动性较弱的近南北向断裂, 包括元谋断裂、易门断裂和普渡河断裂等。红河断裂带的右旋走滑和小江断裂的左旋走滑矢量分析可知, 滇中次级块体向南东 145° 方向平移, 平移速率约为 3.5 mm/a; 而与红河断裂带相比, 小江断裂带上约 7.6 mm/a 的剩余左旋滑动速率值则是滇中次级块体发生顺时针转动的运动分量。已知 $r = 150$ km, 则依据情况 2 给出的计算公式可得绕其几何中心转动的角速度为 $1.5^{\circ}/\text{Ma}$ 。小江断裂带中南段东西两支的张性倾滑分量、红河断裂南段的挤压逆分量、红河断裂北段张性倾滑分量(滇西张性区)等是滇中次级块体顺时针转动在边界带上的局部应变响应。

2.3.4 其他块体 保山-普洱块体(Ⅲ)和密支那-西盟块体(Ⅳ)位于红河断裂以西的滇西南、缅甸和老挝境内, 属印度板块与欧亚板块碰撞强变形带, 分别介于右旋走滑的北西向红河断裂带、腾冲-澜沧新生断裂带和近南北向 Sagaing 断裂带之间(图 1), 其间发育着一系列北东向次级左旋走滑断裂, 它们所围限的次级块体存在着顺时针转动, 是由红河断裂带、腾冲-澜沧新生断裂带和近南北向 Sagaing 断裂带表现出的近南北向区域右旋剪切变形引起的北东向断

裂左旋走滑和次级块体顺时针转动^[1](图 1, 图 5(a)). 红河断裂带以西永平古地磁实测数据也显示, 晚白垩纪以来滇西南各级块体确实发生过大规模的顺时针转动^[34].

3 最新构造变动的动力源讨论

川滇地区各级块体的最新构造变动包括平移、顺时针转动和垂向隆升等, 是印度板块与欧亚板块碰撞、印度板块北移引起板块边缘或内部强烈隆起、变形局部化和物质(块体)向东逃逸受阻引起的应变响应.

3.1 红河断裂带以西地区

滇西南及其邻近地区近南北向 Sagaing 断裂带、北北西向腾冲-澜沧新生断裂带和北西向红河断裂带等 3 条大型右旋走滑断裂带构成板块边缘宽阔的右旋剪切变形带. Sagaing 断裂带晚第四纪右旋滑动速率达 $34\sim 57\text{ mm/a}$ ^[35], 腾冲-澜沧新生破裂带右旋滑动速率可达 $4\sim 6\text{ mm/a}$, 红河断裂带右旋滑动速率仅 $3\sim 4\text{ mm/a}$, 表现出板块边缘保山-普洱块体(Ⅲ)和密支那-西盟块体(Ⅳ)存在着自西向东量值递减的北向运动, 块体边界断裂带作为这一构造运动的主要承载体, 表现出西侧运动速率大、东侧速率小的主动式右旋走滑, 相当于在被 Sagaing 断裂带与红河断裂带夹持地区的東西两侧施加了一对顺时针力偶作用, 引起其内部北东向次级断裂的左旋走滑和块体的顺时针转动, 符合区域右旋剪切变形带内部次级断裂左旋走滑及其围限块体顺时针转动模型^[1]. 因此, 红河断裂带以西地区各级块体的顺时针转动是印度板块与欧亚板块之间北向运动速率西大东小递减形成的右旋剪切变形带的应变响应, 印度板块向北偏东的运移和对 Sagaing 断裂带东侧块体施加的挤压作用分量是各级块体作顺时针转动的力源.

3.2 川滇菱形块体地区

最新构造变动的矢量分析和 GPS 实测到的现今地壳运动^[36~38]一致地显示, 羌塘地块、马尔康块体、川西北次级块体和滇中次级块体等存在着自西向东连续向南偏转的东向运动, 表明红河断裂带以北川滇地区最新构造变动的力源来自于青藏高原物质东向滑移: 羌塘地块与川西北次级块体之间近南北向弧形逆倾滑性质的金沙江断裂带一方面吸收了部分羌塘地块向东滑移量, 另一方面把剩余的向东滑移量传递给川西北次级块体, 使其继续向东滑移, 但由于东部华南地块的强烈阻挡, 川西北次级块体滑移方向被迫向南偏转, 引起次级块体的顺时针转动和向南东的滑移. 同样, 带有逆倾滑分量的丽江-小金河断裂带吸收了部分川西北次级块体南东向的滑移分量(约 2 mm/a), 并把剩余滑移量传递给滇中次级块体, 由于东边界断裂走向从北西偏转成近南北, 滇中次级块体被迫作顺时针转动和南南东向平移, 即次级块体南东至南南东向平移和顺时针转动是青藏高原羌塘地块向东滑移在东部受阻引起的被动式转向结果.

因此, 无论是红河断裂带以西地区块体的顺时针转动, 还是川滇菱形块体地区块体南东向平移叠加顺时针转动, 它们都是印度板块与欧亚板块碰撞、印度板块北偏东向运移在青藏高原与相对稳定的华南地块之间近南北向右旋剪切变形区的应变响应, 但顺时针转动模式有明显区别(图 1): 红河断裂带以西地区是板块边缘近南北向至北西向右旋剪切变形带内部次级北东向断裂左旋走滑, 引起次级块体的顺时针转动; 而川滇菱形块体地区明显的顺时针转动则主要起因于青藏高原中部羌塘地块东向滑移, 并在与华南地块交接部位强烈受阻, 造成川滇菱形块体东西两侧边界断裂滑动速率绝对值东大西小, 引起川滇菱形块体内部次级块体叠加在南东向平移运动之上的被动式顺时针转动.

值得一提的是, 羌塘地块和川滇菱形块体的东向或南东向平移表明青藏高原物质确实存在着东向逃逸或侧向挤出^[16], 但挤出速率或幅度具有由西向东分段减弱的特征, 突变点发生在横向活动逆断裂带上, 包括羌塘地块与川西北次级块体之间的金沙江断裂带、川西北与滇中两次级块体间的丽江-小金河断裂带等, 它们逐个把西侧或北西侧块体的一部分东向或南东向平移运动转化为抬升运动。由此可见, 由于存在横向活动逆断裂带吸收、转换平移运动分量的客观事实, 青藏高原物质向东逃逸现象更符合“叠瓦状逆冲转换-有限挤出模型”特征。

4 结论

综上所述, 川滇地区可划分为 4 个一级活动块体, 其中川滇菱形块体、保山-普洱块体和密支那-西盟块体受次级北东向断裂的切割可进一步划分出多个次级块体。一级块体边界活动断裂的左旋滑动速率每年可达数毫米至十几毫米, 次级北东向活动断裂的滑动速率每年约数毫米。马尔康块体、川西北次级块体和滇中次级块体不仅具有 3.4~5 mm/a 南东向的平移速率, 还存在角速度 1.4~4.0°/ma 的顺时针转动, 它们是青藏高原羌塘地块东向滑移受阻引起的板内应变产物; 红河断裂带以西地区的各级块体存在着自西向东减弱的北向平移和顺时针转动, 是板缘北向差异运动引起的应变响应。由于存在存在横向活动逆断裂带吸收、转换平移运动分量, 青藏高原物质向东逃逸或侧向挤出速率和幅度是有限的, 为“叠瓦状逆冲转换-有限挤出模型”。

参 考 文 献

- 1 Nur A, Ron H, Scotti O. Kinematics and mechanics of tectonic block rotations. *Geophysical Monograph*: 49/IUGG Series 4, 1989. 31~46
- 2 丁国瑜, 主编. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991. 600
- 3 Scotti O, Nur A, Estevez R. Distributed deformation and block rotation in three dimensions. *J. Geophys Res*, 1991, 96 (B7): 12225~12243
- 4 Nur A, Ron H, Beroza G. The nature of the Landers-Mojave earthquake line. *Science*, 1993, 261: 201~203
- 5 马杏垣, 主编. 中国岩石圈动力学纲要. 1: 400 万中国及邻近海域岩石圈动力学图说明书. 北京: 地质出版社, 1987. 1~76
- 6 徐锡伟, 程国良, 马杏垣, 等. 华北及其邻区块体转动模式和动力来源. *地球科学——中国地质大学学报*, 1994, 19(2): 129~138
- 7 李 坪, 汪良谋. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨. *地质科学*, 1975, 4: 308~325
- 8 阚荣举, 王绍晋, 黄 琨, 等. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动. *地震地质*, 1983, 5(2): 79~90
- 9 汪良谋. 康滇活动构造带的形成机制及其强震活动. 见: 中国地震学会地震地质专业委员会主编. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社, 1982
- 10 丁国瑜. 我国大陆的新构造变形与板内现代运动. 前寒武纪构造、活动构造与地震以及其他. 见: 国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会——第三届全国构造地质会议论文选集(Ⅱ). 北京: 科学出版社, 1990. 73~85
- 11 邓起东, 徐锡伟, 于贵华. 中国大陆活动断裂的分区特征及其成因. 见: 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1994. 1~14
- 12 Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic reconstruction of southeast Asia. *Tectonophysics*, 1995, 151: 85~138
- 13 Xu X W, Deng Q D. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China. *J Geophys. Res*, 1996, 101(B3): 6209~6231
- 14 向宏发, 魏顺民, 徐锡伟, 等. 川滇南部地区活动块体划分与现今运动特征初析. *地震地质*, 2000, 22(3): 253~264
- 15 陈国星, 周荣军, 黄金莉, 等. 川滇活动构造区晚新生代以来构造变形与强震破裂. 见: 新构造有环境. 北京: 地震出版

- 社, 2001. 185~198
- 16 Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 1976, 264:319~364.
- 17 Guo S M, Xiang H F, Zhou R Q, et al. Longling-Lancang fault zone in southwest Yunnan, China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (4): 376~379
- 18 吴乾蕃, 祖金华, 谢毅真, 等. 云南地区地热基本特征. *地震地质*, 1988, 10(4): 177~183
- 19 汪辑安, 徐 青, 张文仁. 云南大地热流及地热地质问题. *地震地质*, 1990, 12(4):367~377
- 20 汪集场, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). *地震地质*, 1990, 12(4): 351~366
- 21 Allen C R, Zhuoli L, Hong Q, et al. Field study of a highly active fault zone: the Xianshuihe fault of southwestern China. *Geol Soc Amer Bull*, 1991, 103:1178~1199
- 22 Zhao G, Liu W, Wei H, et al. The Quaternary slip rate and segmentation of the Xianshuihe active fault zone. In *Proceedings of the PRC-USA Bilateral Symposium on the Xianshuihe Fault Zone (held in Chengdu, China, Oct. 1990)*. Beijing: Seismol Press, 1992. 41~57
- 23 任金卫. 则木河断裂晚第四纪位移及滑动速率. *地震地质*, 1994, 16(2): 146
- 24 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. 237
- 25 云南省地震局. 一九九六年丽江地震. 北京: 地震出版社, 1998. 188
- 26 魏顺民, 计凤诒, 向宏发, 等. 红河活动断裂带. 北京: 地震出版社, 2001. 1~172
- 27 沈 军, 汪一鹏, 任金卫. 中国云南德钦-中甸-大具断裂带第四纪右旋走滑运动. 见: 青藏高原岩石圈现今变动与动力学(3). 北京: 地震出版社, 2001. 123~135
- 28 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社, 1993. 368
- 29 魏顺民. 滇西北地区活动断裂. 北京: 地震出版社, 1990
- 30 周荣军, 蒲晓虹, 何玉林, 等. 四川岷江断裂带北段的新活动、岷江断块的隆起及其与地震活动的关系. *地震地质*, 2000, 22(3): 285~294
- 31 周荣军, 李勇, Densomre A L, 等. 青藏高原东缘晚第四纪构造变形的最新证据. 见: 中国地震学会第 8 次学术讨论大会论文摘要集. 北京: 地震出版社, 2000
- 32 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所. 东昆仑断裂带. 北京: 地震出版社, 1999. 1~186
- 33 裴锡瑜. 晚第四纪安宁河活动断裂分段的基本特征. *四川地震*, 1998(4): 52~61
- 34 Yo-ichiro Otofujii, Yuyan Liu, Mashiko Yokoyama, et al. Tectonic deformation of the southwestern part of Yangtze craton inferred from paleomagnetism. *EPSL*, 1998, 156: 47~60
- 35 Anne R. Reconstruction de la zone de collision Inde-Asie Etude centree sur l'Indochine. Paris: Ph D thesis of Universite Paris 7, 1999. 1~230
- 36 Wang Q, Zhang P, Jeffrey T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System Measurements. *Science*, 2001, 294: 574~577
- 37 王 琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(7): 529~536
- 38 魏顺民, 向宏发, 周瑞崎, 等. 滇西南龙陵-澜沧断裂带: 大陆地壳上一条新生的破裂带. *科学通报*, 1999, 44(19): 2118~2121