

红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与FT测年^{*}

向宏发^{①**} 万景林^① 韩竹军^① 虢顺民^① 张晚霞^① 陈立春^① 董兴权^②

(① 中国地震局地质研究所, 北京 100029; ② 云南省地震局, 昆明 650204)

摘要 红河断裂带后期大型右旋走滑运动在地质上表现为: 北段-滇西北的正断裂陷南东向伸展变形和中南段的右旋剪切断错. 通过对剑川、弥渡东南、元江、元阳等典型断裂段中新世以来地层变形与断裂活动关系的研究, 认为红河断裂带于中新世以来有过2期正断剪切为主的断裂右旋活动. 对采自上述典型断裂段内与断裂右旋剪切活动相关的样品进行了磷灰石裂变径迹测年(简称FT测年, 下同), 同时以所测单颗粒年龄及围限径迹长度, 选择Laslet退火模式完成样品所经热历史的反演计算得出: 断裂带在 (5.5 ± 1.5) 和 (2.1 ± 0.8) MaBP, 有过2次明显的断层剪切错动. 断裂中南段元江-元阳一带在3.6~3.8 MaBP及1.6~2.3 MaBP发育2期山体快速隆升, 这与红河断裂中新世末以来存在上述二次右旋正断位错事件相对应.

关键词 地质分析 裂变径迹测年 右旋位错时代 红河断裂

鉴于红河断裂带的巨大规模和特殊地理位置, 有关它的活动习性、滑移规模及其发生时代一直是国内外地学工作者十分关注的研究目标^[1-9]. 一些研究已指出, 该断裂带大型左旋走滑运动大致发生在30~20 MaBP, 其左旋走滑位移量在400~500 km尺度范围^[2-4,10], 然而从左旋剪切到右旋剪切的转化, 尤其是对于红河断裂带右旋走滑运动发生的时代与右旋位错量, 至今尚无详细的研究资料. 虽然一些研究者通过点苍山、哀牢山的热年代学测试, 推测后期山体隆升的快速冷却事件与断裂右旋走滑运动相关

^[9,10]. 但对与这一运动相关的地层变形、断层错动等地质形迹及相关的构造热年代学研究相对薄弱, 鉴于此, 本文从加强区内中新世以来的地层变形与断层构造变动的实际调查出发, 同时对与断裂活动密切相关的构造岩样品进行大量的磷灰石裂变径迹热年代学的测试研究. 并试图以所测得单颗粒年龄、围限径迹长度, 选择一定的退火模式^[11], 完成样品所经热历史的反演, 以研究断裂活动的年代学信息. 并重点将FT测年研究方法与宏观地质分析紧密结合研究、讨论红河断裂后期右旋走滑运动发生的年代及其

收稿日期: 2006-04-10; 接受日期: 2006-07-21

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40272087)

** E-mail: xianghfa@yahoo.com.cn

有关地质构造问题。

1 区域地质概况

展布于中国西南的红河断裂带作为扬子地块与印支地块间的边界断裂, 是一条大型走滑断裂带。同时, 也是一条经历长期演化(陆-陆碰撞、陆核增生、挤压剪切)的块间构造变形带。新构造时期以来, 它作为印支地块与扬子地块间的边界断裂, 又经历了早期(古近纪)的大型左旋剪切运动和后期(新近纪以来)的右旋走滑运动。而从中新世经第四纪至今仍继续其右旋走滑运动特征。

从红河断裂带及其旁侧两盘中新世以来的地层分布、盆地性状与断裂性质来看, 以断裂为界可分为四个相对应的变形区(图 1): 断裂东北盘, 北区(滇西北地区)以南东向伸展裂陷为主, 南区为滇东中新世以来的压缩变形区; 断裂西南盘的南区为藤条河中新世深裂陷区, 其长条形裂陷盆地向西北延伸与红河主断裂呈锐角相交, 示明显的尾端拉伸作用。而其北区为兰坪-云龙第三纪压缩盆地。红河断裂带内部则发育一系列右旋断错水系、山盆与岩体的地质形迹。上述“四区一带”的变形构成一幅大致以元江—者龙为中心的右旋走滑位错断裂体系。

2 右旋位错运动的地质分析

2.1 研究区的总体变形特征

我们注意到红河断裂及其旁侧的中新统与上新统两套地层的变形样式、强度悬殊甚大, 中新统普遭挤压褶皱^[12], 并受挤压剪切为主的断裂变动, 而上新统则变形轻微, 并以正断走滑变动为主。如剑川盆地, 中新统剑川组砂岩、泥岩遭挤压褶皱, 地层倾角达 45°~65°, 褶皱轴向多在 50°~60°, 显示遭受北西—南东向的挤压作用, 而上新统则变形较弱且不整合复于中新统之上。据我们最近的调查, 滇东的玉溪盆地西侧上第三系棕红色砂泥岩倾角多在 30°~50°左右, 构成一系列轴向 45°~60°的中强褶皱。很显然, 它也与川滇菱形块南东向运动及红河断裂右旋走滑运动相关^[13,14]。在断裂带内部的元江、红河一带中新统与上新统的变形也有明显强弱差别, 甚至在一些地区上新统明显不整合于中新统之上, 表明在区内中新世以后有过一次比较强烈地且以挤压为主的地壳运动,

而这一挤压运动从方向和方式上看, 可与红河断裂早期右旋走滑运动相关。

2.2 带内各典型区段的地质变形

剖析红河断裂带内北、中、南各区段的变形样式(图 1), 可以进一步认识红河断裂带作为一个整体其大规模右旋位错运动的发生与发展的时空过程。

2.2.1 剑川地区

剑川盆地及其主边控断裂呈北北东向, 向南与红河断裂呈小角度相交(图 2-A), 可视为红河断裂右旋走滑的尾端破裂区^[15,16]。但第三纪以来的沉积与变形表明, 自始新世起至今, 区内地壳经历过多次构造变形。

从西向东地势的高度变低, 出露地层自老至新依次有三叠系、古近系、中新统、上新统和第四系(图 2-A区放大图), 且古新统与中生界, 始新统与古新统及上新统与中新统间均呈明显不整合接触。其中, 始新统的宝相寺组(Eb)或丽江组均有巨厚砂砾岩、砾岩堆积, 属典型山前磨拉石建造; 在剑川西上新统底部也有较厚的底砾岩沉积, 且上新统产状平缓, 明显不整合于遭强烈挤压变形的中新统砂泥岩之上。表明古新世及中新世末的两次以挤压隆升为主的构造变动在区内较为强烈^[12]。从图 2-A可以看出, 伴随中新统的褶皱隆升尚有切错中新统的正断裂活动(图 3(a), 4(a))及相应的(上上新世)粗面岩沿断裂喷溢。测年资料表明, 上新统及其上覆上新统粗面岩的 FT 年龄在 3~4 Ma(表 1), 即剑川地区中新世以来的隆升与裂陷运动应发生在距今 3~4 Ma 前后的中新世以后。

2.2.2 弥渡东南地段

从弥渡东南开始, 红河断裂右旋位错的形迹更清楚规模也愈来愈大。据我们最近调查, 弥渡东南的苴力-团山一带红河断裂发育在二叠系与燕山晚期(t^3_s)花岗岩间, 在二叠系板片岩与花岗岩接触处表现为挤压剪切性质, 致使花岗岩的挤压变形包体卷入板片岩挤压带内, 而在花岗岩体内部则主要表现为张剪脆性破裂特征, 形成宽达 300~400 余米的断裂破碎带和碎裂岩化角砾岩带。从小断层擦线、张节理面与主断面关系分析, 上述破碎带应主要为后期右

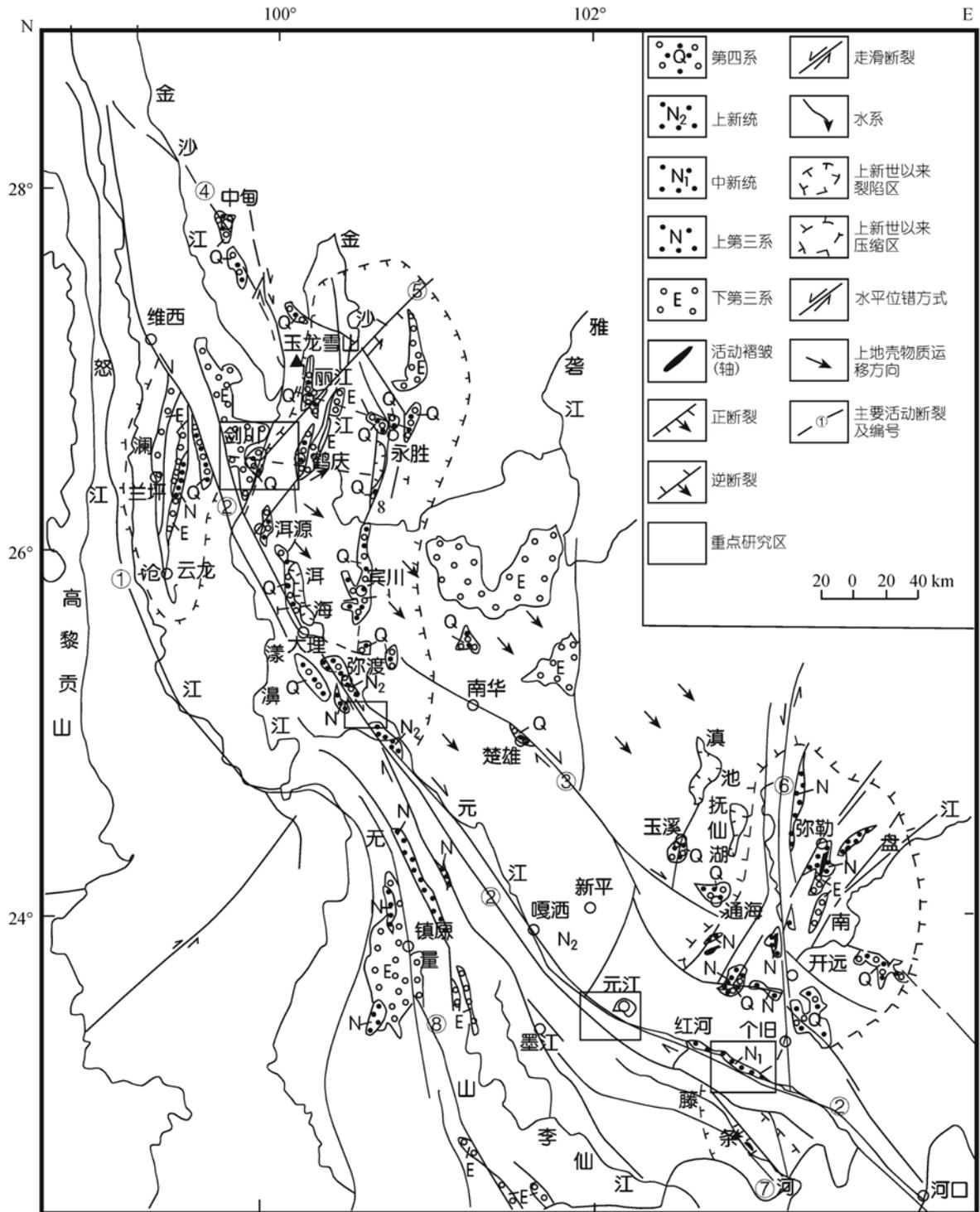


图 1 红河断裂带及两侧伴生构造的平面分布

- 1. 澜沧江断裂; 2. 红河断裂; 3. 楚雄-通海断裂; 4. 中甸-龙蟠-乔后断裂; 5. 丽江-小金河断裂; 6. 小江断裂; 7. 藤条河断裂;
- 8. 程海-宾川断裂; 9. 无量山断裂

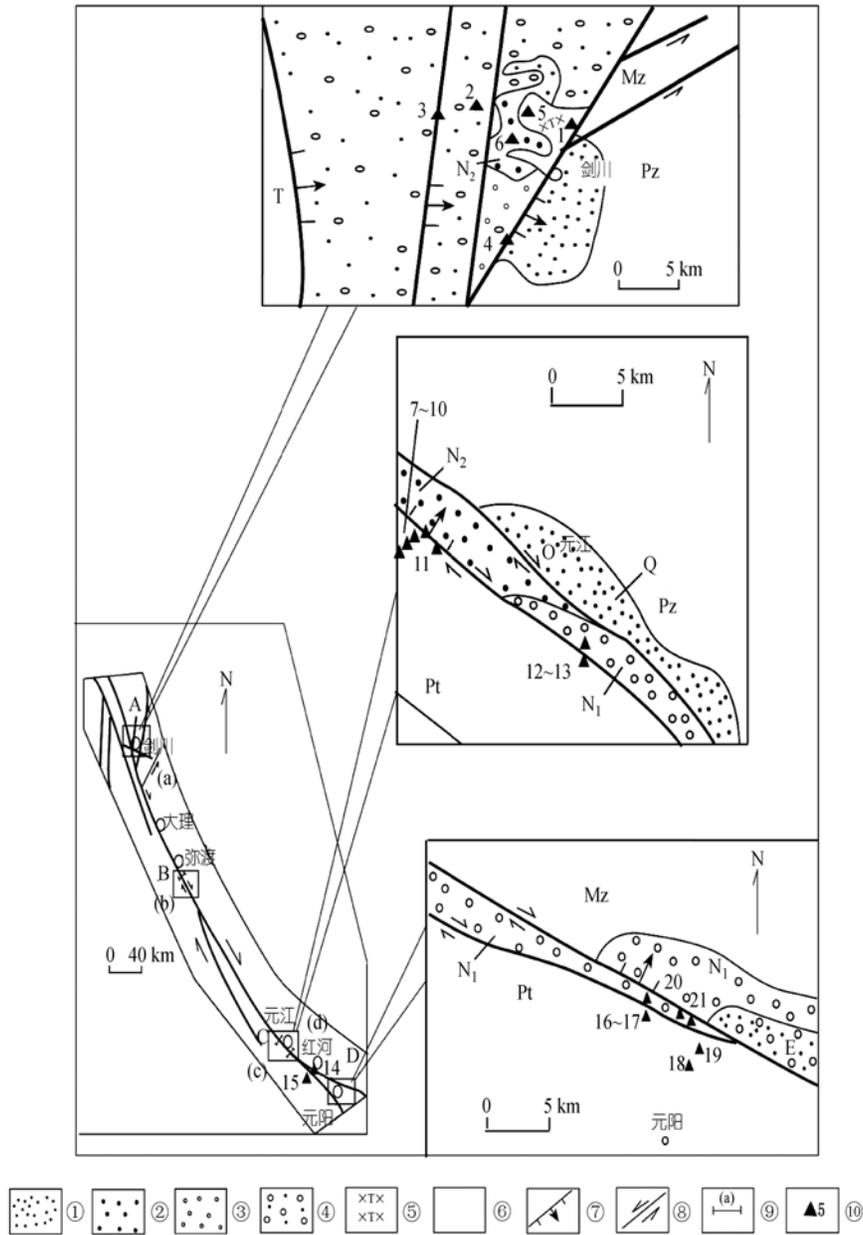


图 2 红河断裂右旋走滑运动及 FT 采样点平面分布图

① 第四系; ② 上新统; ③ 中新统; ④ 古近系; ⑤ 粗面岩; ⑥ 前古近系; ⑦ 正断裂; ⑧ 走滑断裂; ⑨ 剖面位置及编号; ⑩ FT 采样点及编号

旋剪切错动产物(图 3(b), 4(b)). 在平面上该地段内红河断裂呈向东南撒开的帚状, 即由两条分支断裂(F_1 , F_2)呈小角度向北与主断裂(F_3)相交汇(图 3(b), 左). 上述三条断裂(F_1 , F_2 和 F_3)均分别右旋切错燕山晚期花岗岩体, 其右旋位移量依次为 11.5, 3.5 和 13 km,

即总位错量为 28 km¹⁾. 这与由断裂位移量(D)与断层物质厚度(t)的经验关系(简称 $D-t$ 关系)^[17,18]求得的位移量(32 km)差别不大. 据花岗岩体断层角砾岩石英颗粒的 SEM 分析并结合 FT 测年数据分析, 这一右旋位错应发生在中新世-上新世期间¹⁾.

1) 向宏发. 红河断裂带中南段中新世以来右旋位错的定量研究. 2004

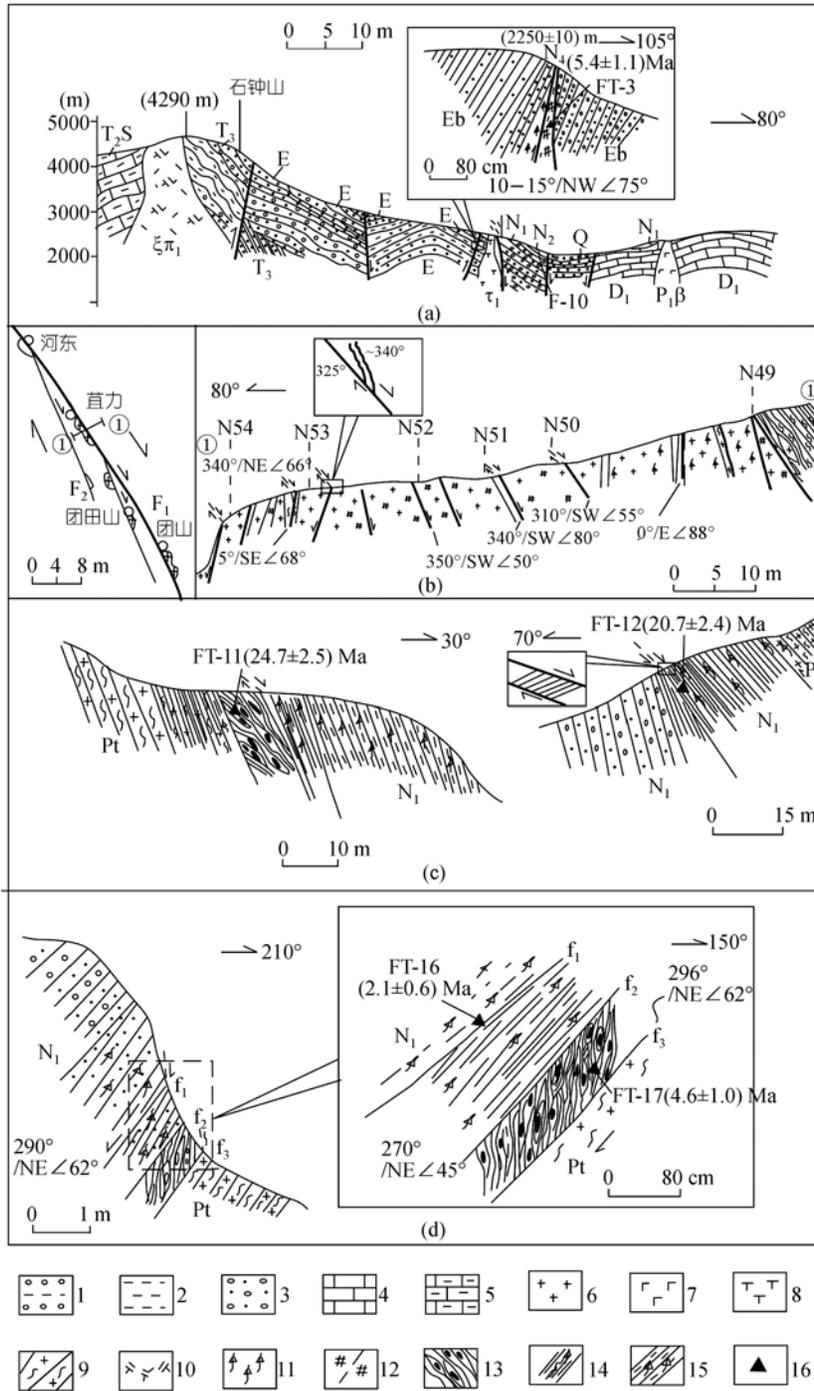


图 3 红河断裂各典型区段断裂活动实测剖面(剖面位置见图 2)

(a) 剑川石钟山; (b) 弥渡团山-直力: 左为平面图, 右为直力剖面; (c) 元江: 左为麻木树剖面, 右为深沟河剖面; (d) 元阳我贾: 左为剖面, 右为局部放大平面图。1. 砂岩; 2. 泥岩; 3. 砂砾岩; 4. 灰岩; 5. 泥灰岩; 6. 花岗岩; 7. 玄武岩; 8. 粗面岩; 9. 片麻岩; 10. 正长斑岩; 11. 断层角砾岩; 12. 断裂破碎带; 13. 断裂糜棱岩挤压扁豆体带; 14. 断裂挤压劈理带; 15. 断层泥带; 16. FT 采样点及年龄

表 1 磷灰石裂变径迹测试数据^{a)}

样品号	分布高程 /m	N_c	$\rho_a(N_a)$ ($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$)	$\rho_s(N_s)$ ($\times 10^5 \text{cm}^{-2}$)	$\rho_t(N_t)$ ($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$)	平均铀含量 / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$P(\chi^2)$ %	r	裂变径迹年龄 ($\text{Ma} \pm 1\sigma$) ^{b)}	平均径迹长度 ^{c)} ($\mu\text{m} \pm 1\sigma$) (N_j)	标准误差 / μm
ApH-1	2430	13	1.406 (3524)	0.085 (5)	1.286 (759)	11.3	91.2	0.433	1.6 \pm 0.7	14.17 \pm 0.46 (2)	0.65
ApH-2	2250	18	1.402 (3516)	1.909 (168)	2.998 (2638)	26.3	2.9	0.916	15.8 \pm 1.8	12.48 \pm 0.45 (15)	1.76
ApH-3	2240	22	1.399 (3508)	0.437 (33)	1.999 (1509)	17.6	77.4	0.557	5.4 \pm 1.1	13.53 \pm 0.32 (15)	1.26
ApH-4	2290	16	1.396 (3500)	0.175 (14)	2.978 (2382)	26.2	36.3	0.586	1.5 \pm 0.4	13.48 \pm 0.68 (2)	0.96
ApH-5	2290	23	1.392 (3492)	0.0524 (88)	3.883 (6524)	34.3	0.8	0.75	3.1 \pm 0.5	14.07 \pm 0.18 (36)	1.10
ApH-6	2450	11	1.381 (3459)	0.200 (11)	2.018 (1110)	18.0	44.0	0.728	2.4 \pm 0.8	15.62 \pm 0.08 (2)	0.12
ApH-7	1870	16	1.385 (3468)	0.137 (16)	2.068 (2420)	18.4	39.4	0.607	1.6 \pm 0.4	14.18 \pm 0.66 (2)	0.94
ApH-8	1530	23	1.386 (3474)	0.4512 (74)	2.883 (4728)	25.5	84.2	0.845	3.8 \pm 0.6	14.49 \pm 0.43 (10)	1.37
ApH-9	1300	23	1.9392 (3485)	2.762 (337)	2.759 (3366)	24.4	68.9	0.907	24.5 \pm 2.5	14.59 \pm 0.23 (20)	1.03
ApH-10	1050	22	1.396 (3495)	0.558 (67)	3.614 (4337)	31.8	31.8	0.761	3.6 \pm 0.6	13.98 \pm 0.30 (17)	1.24
ApH-11	970	18	1.400 (3504)	4.200 (378)	4.184 (3766)	36.8	73.9	0.962	24.7 \pm 2.5	14.43 \pm 0.15 (59)	1.15
ApH-12	506	19	1.403 (3513)	1.976 (168)	2.361 (2007)	20.7	0.0	0.951	20.7 \pm 2.4	13.78 \pm 0.27 (11)	0.90
ApH-13	490	21	1.407 (3522)	1.367 (149)	2.137 (2329)	18.7	0.0	0.875	12.3 \pm 2.4	13.96 \pm 0.24 (12)	0.83
ApH-14	436	18	1.411 (3531)	1.063 (134)	2.044 (2575)	17.8	0.4	0.788	11.9 \pm 1.7	13.80 \pm 0.27 (19)	1.20
ApH-15	509	22	1.414 (3540)	4.922 (566)	4.027 (4631)	35.0	0.0	0.941	26.1 \pm 2.5	14.39 \pm 0.16 (51)	1.14
ApH-16	493	21	1.477 (3689)	0.187 (17)	2.545 (2316)	21.2	1.8	-0.097	2.1 \pm 0.6	14.02 \pm 0.44 (6)	1.08
ApH-17	493	22	1.421 (3558)	0.225 (43)	1.177 (2249)	10.2	1.4	0.496	4.6 \pm 1.0	14.29 \pm 0.24 (17)	0.99
ApH-18	1000	19	1.425 (3567)	0.143 (9)	1.575 (992)	13.6	48.7	0.367	2.3 \pm 0.8	13.54 \pm 0.75 (13)	1.30
ApH-19	733	4	1.429 (3576)	0.959 (23)	1.617 (388)	13.9	52.8	0.590	14.9 \pm 3.4	14.08 \pm 0.25 (5)	0.57
ApH-20	291	1	1.32 (3585)	1.333 (8)	1.617 (97)	13.9	100	1.000	20.8 \pm 7.8	13.42 \pm 0.51 (3)	0.89
ApH-21	251	5	1.436 (3594)	0.2500 (10)	1.292 (517)	11.1	81.1	0.680	4.9 \pm 1.6	13.25 \pm 0.41 (10)	1.30

a) N_c : 样品测试颗粒数; ρ_a : SRM₆₁₂ 铀标准玻璃径迹密度; N_a : 铀标准玻璃径迹数; ρ_s : 样品自发径迹密度; N_s : 自发径迹数; ρ_t : 样品诱发径迹密度; N_t : 诱发径迹数; $P(\chi^2)$: 表示自由度为 N_c-1 时 χ^2 的概率; r : 自发径迹数与诱发径迹数间的相关系数; N_j : 围限径迹测试条数. b) 样品裂变径迹年龄; 当 $P(\chi^2) > 5\%$ 时, 年龄选用“池年龄”(pooled age), 当 $P(\chi^2) \leq 5\%$ 时, 年龄选用中心年龄 [49]. c) 围限径迹平均长度, 单位 μm ; Zeta_{SRM612}=352 \pm 29 (J.L.Wan). 裂变径迹测年由中国地震局地震动力学开放实验室的裂变径迹实验室完成

2.2.3 元江地区

从元江的漠沙经红河至元阳一带, 后期右旋位错的红河断裂带表现为狭长条带状断裂槽谷, 其内堆积有中新世以来的河湖相砂泥岩, 部分含煤、石膏, 一些地段夹带碎屑岩建造. 这一套以河湖相为主的堆积物厚度巨大(可达 1500~2000 m), 呈条形断片镶

嵌于红河断裂带内, 断片的东西两侧分别为古生界及元古代哀牢山变质岩系, 东西两相对比, 地貌落差仅数百米 [13]. 这似乎表明红河断裂的右旋剪切位错主要局限在宽约数公里的元江-红河断陷盆地内. 因而, 深入研究哀牢山变质带以东中新世以来的这套盆地内堆积物的沉积变形及构造演化可以获取红河断裂右旋位错及其发生时代的许多重要信息.

在元江-元阳一带红河断裂带的断层构造岩明显分为先后有别的两期,早期以挤压剪切错动为主形成的糜棱岩、挤压扁豆体,它们胶结坚硬,分布在近哀牢山一侧;后期属以剪切正断错动为主形成断层角砾岩、碎裂岩及断层泥带,它们呈半胶结状,较为疏松破碎,且多分布在靠近红河河谷一侧,并多发育在中新统上新统间,它们显然属于力学性质和运动学方式不同的两期断层构造岩体系。

如在元阳县西北的麻木树一带,断裂发育在哀牢山群花岗片麻岩与上第三系砂泥岩间,断层构造岩带宽达 10 余米,自西向东,断层构造岩依次是胶结坚硬的元古界片麻岩劈理化糜棱岩、挤压扁豆体带和中新统砂泥岩的断层破碎带(半胶结状)及断层泥带(图 3(c)左),剖面上见到的不同性质、不同胶结或成岩度的断层构造岩指示:红河断裂经历力学性质和时代先后有别的多期次运动,且早期以挤压剪切为主,后期以正断剪切为主。采自元古界片麻岩挤压扁豆体带内的构造岩经 FT 测年其最后一次强烈活动距今(24.7±2.5) Ma(详后)。这与宏观地质分析接近,即相当于中新世早期前后该断裂段有过一次较强烈的挤压剪切活动。

元江东南深沟河的断裂剖面与上述剖面情况大致相似,断裂发育于哀牢山群变质岩与中新统砂泥岩、砂砾岩之间(图 3(c)右)。采自遭强烈挤压变形的中新统砂泥岩柔褶带内的样品,其 FT 年龄为(20.7±2.4) Ma,同样表明该断裂的一次强烈挤压剪切运动发生在中新世早期。

2.2.4 元阳地区

元阳县城北我贾村附近公路边一新开水渠揭露出哀牢山变质岩与中新统砂砾岩间一个很好的断层构造岩带剖面。在该剖面上,从北东至南西依次可见到中新统砂砾岩的断层角砾岩带、元古界片麻岩的糜棱岩化构造岩和线理发育的挤压扁豆状糜棱岩带(图 3(d), 4(c), 4(d))。从片麻岩中扁豆状构造长轴及线理面与主断面关系分析为断裂右旋剪切错动物。自 SW 向 NE,构造岩的成岩度和胶结度有序变差。从构造岩的类型从挤压糜棱岩-劈理化糜棱岩-压碎角砾岩、碎裂岩带的变化看,该断裂经历从挤压剪切到张

性剪切的转变。近元古界片麻岩处的压剪性构造岩的 FT 年龄为(4.6±1.0) Ma,在中新统砂泥岩中的张剪性构造岩样品的 FT 年龄为(2.1±0.6) Ma。

上述资料表明,自距今年 4.6 Ma 以来,红河断裂南段已处在强烈的右旋剪切运动之中,而距今 2.1 Ma 以来,则以兼有正断的右旋剪切活动为主要特征。后者与第四纪以来红河断裂明显的正断右旋切错山脊水系的情况相一致^[20]。

2.3 右旋位错发生时代的地质分析

综合上述地质资料分析可以看出,红河断裂北段的剑川一带中新世以后有过一次强烈挤压褶皱隆升,之后遭夷平,上新统地层不整合覆盖在褶皱的中新统之上。随后地壳再次引张破裂,上上新统粗面岩沿裂隙侵位、溢出,覆盖在上上新统地层之上。考虑到滇西北的盆山隆升与裂陷与红河断裂的右旋走滑运动相关,则早期的剪切走滑(伴有挤压)应发生在中新世地层堆积之后上新统堆积之前,而后期的正断裂陷或称之为“伸展”裂陷,应发生在上新世后,其时代应与上上新世粗面岩的侵位与喷溢时间大体相当。断裂南段发育于 Pt 与 N₁ 间的断层构造岩带呈现出明显的早期挤压剪切和后期张性剪切破裂的地质形迹,它们为中新世以来先后两期不同性状的断裂右旋剪切活动。也即自中新世以来红河断裂至少经历过挤压剪切和张性剪切先后两期右旋走滑运动。中段弥渡东南燕山晚期花岗岩与古生代变质岩间的断层活动也有上述先压剪后张剪的两期右旋位错地质形迹,只不过这里更多地是表现出后期张性剪切破裂特征。

上述有关红河断裂带右旋走滑运动的地质资料和相关分析是用 FT 测年法研究确定断裂活动时代的重要基础。

3 FT 测年及其结果

3.1 采样及实验条件

用于 FT 测年的岩石样品均非常新鲜。这些样品分布于红河断裂带的北段和中南段,考虑到本次主要研究目标,多数样品采自断裂构造岩带内部或其附近,另有一部分样品采自与断裂后期正断活动相关的山体隆升部分(见图 2)。裂变径迹测年的矿物为

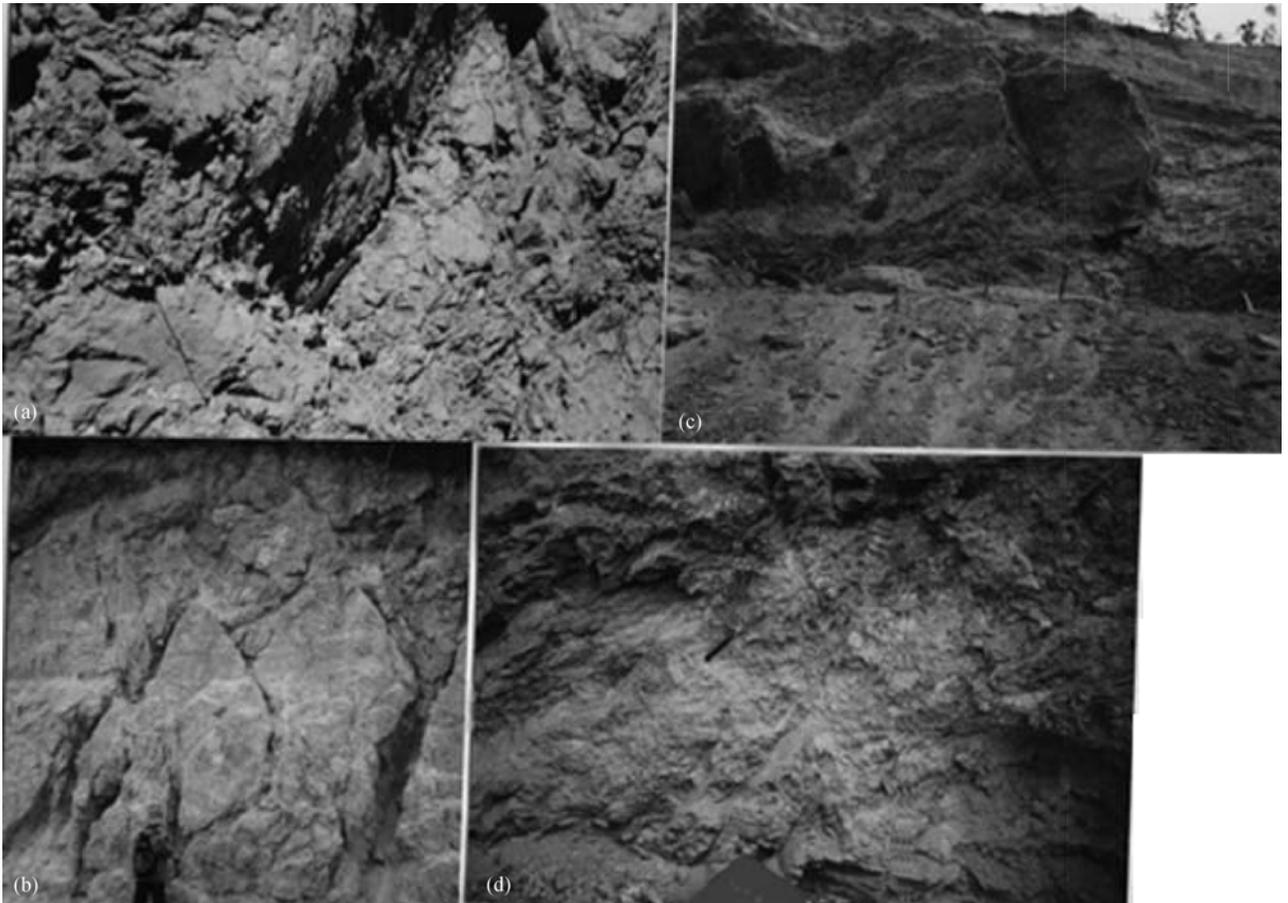


图 4 红河断裂北、中、南各典型段中新世以来断层构造岩

(a) 为剑川 Eb 砂砾岩中发育的 $10\sim 15^\circ\text{NW}/75^\circ$ 断裂碎裂岩带, 擦线示后期正断裂(镜向 NE); (b) 弥渡水田团田山 r^3 花岗岩体中发育的两组近南北向 X 型张剪切型破裂面(镜向 S); (c) 元阳我贾发育于 Pt/N_1 间断裂构造岩带, 右下方为 Pt 片麻岩片劈理化糜棱岩带, 左上方为 N_1 桔黄色砂砾岩之碎裂岩化角砾岩带; (d) 同(c), 局部放大(镜向 NE)

磷灰石, 采用外探测器法. 磷灰石蚀刻条件为 7% HNO_3 , 室温, 40 s; 锆石为 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HF} = 1 : 1$, 185°C , 9 h; 外探测器采用低铀含量白云母, 蚀刻条件为 40% HF, 室温, 20 min; Zeta 标定^[21]选用国际标准样(详见数据说明). 标准玻璃为美国国家标准局 SRM612 铀标准玻璃. 岩样经破碎、重液分选、鳞选出磷灰石矿物, 制样蚀刻加盖白云母外探测器后, 送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照. 径迹统计用 OLYMPVS 偏光显微镜, 在放大 1000 倍浸油条件下完成(所有这些流程都由地震局国家重点实验室裂变径迹实验室完成). 本研究区采集的 21 个样品的磷灰石裂变径迹测试数据见表 1.

3.2 断裂活动时代的 FT 测年原理

用裂变径迹热年代学研究断裂活动是基于一定规模的断裂活动所产生的热量足以使断裂带内的磷灰石中累积的裂变径迹发生部分或完全退火, 从而使磷灰石裂变径迹年龄表现为小于围岩年龄. 所谓退火是指矿物中已形成的裂变径迹在温度达到一定范围时会发生缩减, 超过某一温度后会完全消失, 这一温度称为该矿物的封闭温度, 温度范围称为该矿物的不完全退火带. 针对磷灰石而言其封闭温度为 $110^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 退火带为 $60\sim 110^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ^[22,23]. 在对采自断裂带内磷灰石样品进行裂变径迹测年的同时, 关注所测磷灰石围限径迹的平均长度及其配分形态

特征可以获得更多有关断裂活动的信息,具体情况有:(1)若测得磷灰石裂变径迹年龄远远小于围岩年龄,平均围限径迹长度大于或接近 14 μm ,配分形态为单峰,峰形窄而靠右,表现为单一热事件信息时(图 5),这说明断裂活动规模较大,能量释放使磷灰石裂变径迹完全退火,随后冷却重新累计年龄,所测磷灰石裂变径迹年龄基本代表断裂最后一次活动的时间。(2)若测得磷灰石裂变径迹年龄较围岩年轻,但平均围限径迹长度却较短,远未达 14 μm ,且配分形态复杂,为双峰或乱峰,表现为热事件叠加信息,此时所测样品若为断层泥或碎裂岩,表明断裂活动规模较小,至少为两次活动的叠加,此年龄为混合年龄,不能简单视为断裂最后一次活动的时间。依据上述原理本文完成了采自红河断裂带各区段的(21 个)磷灰石样品的裂变径迹研究。

3.3 测年结果

从表 1 可以看出,磷灰石裂变径迹年龄落在 4 个时段:即 1.5~3.1, 3.6~5.4, 11.9~15.0 和 20~26 Ma,无疑表明红河断裂活动具有多阶段多期次的特点。在参照磷灰石裂变径迹数据及对应的围限径迹长度、配分形态以及所进行的热历史模拟计算结果,本文对红河断裂后期右旋位错可能发生的时代讨论如下:

表 2 序号中的 1~6 号样是直接采自断层构造岩带中的样品,其中 3,4 号采自断裂带中的元古界变质岩或靠近变质岩的坚硬构造糜棱岩中,即采样点远离后期右旋正断活动的部分,其他 4 个样品则采自后期右旋正断活动带内的构造岩。后者在宏观上多表现为成岩度、胶结度较差的破裂化角砾岩或断层泥带(见前文)。

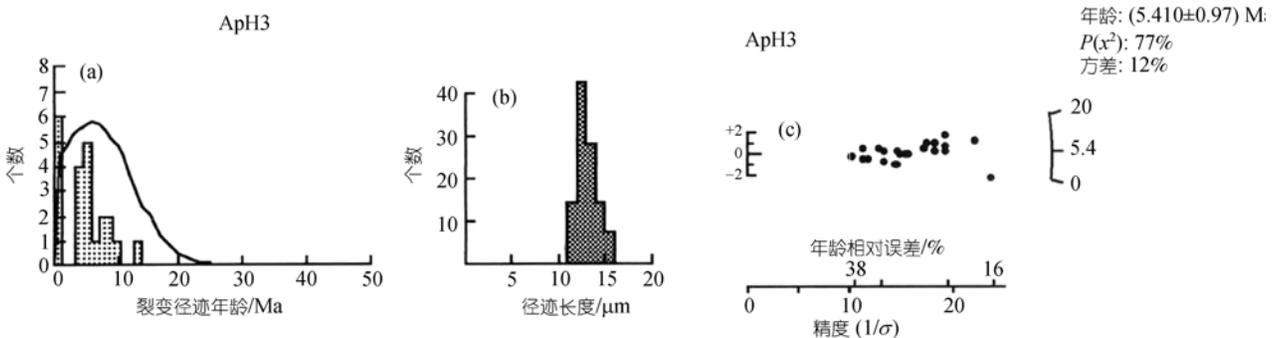


图 5 磷灰石裂迹径迹单颗粒年龄直方图(a)、围限径迹长度直方图(b)及年龄放射图(c)

表 2 红河断裂带磷灰石裂变径迹热历史模拟参数^{a)}

序号	样品号(海拔/m)	模拟长度/ $\mu\text{m} \pm 1\sigma$	测试长度/ $\mu\text{m} \pm 1\sigma$	模拟年龄/Ma	测试年龄/ $\text{Ma} \pm 1\sigma$	抬升速率/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	K-S 检验	年龄拟合度
1	ApH-1	14.9 \pm 0.4	14.17 \pm 0.46	1.6	1.60 \pm 0.7		1.00	1.00
2	ApH-3	13.5 \pm 0.7	13.53 \pm 0.32	5.4	5.40 \pm 1.1		0.98	0.98
3	ApH-11	14.4 \pm 0.3	14.43 \pm 0.15	24.7	24.7 \pm 2.5		0.94	1.00
4	ApH-15	14.5 \pm 0.2	14.39 \pm 0.16	30.3	26.1 \pm 2.5		0.99	0.98
5	ApH-16	14.6 \pm 0.6	14.02 \pm 0.44	1.9	2.10 \pm 0.6		1.00	1.00
6	ApH-17	14.2 \pm 0.8	14.29 \pm 0.24	4.8	4.60 \pm 1.0		0.88	0.95
7	ApH-7(1870)	14.5 \pm 0.2	14.18 \pm 0.66	1.6	1.60 \pm 0.4	3.04	1.00	1.00
8	ApH-8(1530)	14.5 \pm 0.6	14.49 \pm 0.43	3.8	3.80 \pm 0.6	1.05	1.00	1.00
9	ApH-10(1050)	14.1 \pm 0.7	13.98 \pm 0.30	3.8	3.60 \pm 0.6	1.11	0.98	0.98
10	ApH-18(1000)	13.9 \pm 0.7	13.54 \pm 0.75	2.3	2.30 \pm 0.8	1.73	1.00	1.00

a) 模拟长度是指由程序预测的径迹平均长度;测试长度是指实测的径迹长度;模拟年龄是指由程序预测的样品年龄;测试年龄是指实测的样品年龄;K-S 检验是指 Kolmogorov-Smirnov 数理统计检验值,表示模拟径迹长度与实测长度之间的拟合程度;年龄拟合度是指模拟年龄与测试年龄之间的拟合程度。当 K-S test 值和年龄拟合度值大于等于 0.5 时,表明模拟结果与测试结果拟合好

反应红河断层带断裂活动的裂变径迹图(图 6)表明红河断裂经历过 3 期主要活动期, 即: 30~25, 5~6 Ma 和 2~3 MaBP.

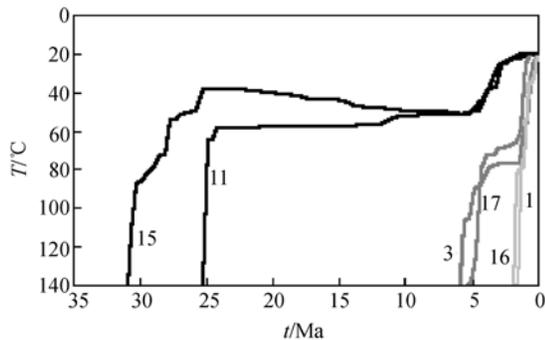


图 6 与断裂活动相关的磷灰石裂变径迹热年代历史图
图中的样品号见表 2

其中 1, 16 号样品分别采自剑川和元阳两地发育于第三纪地层中的右旋正断裂, 它们显示出 $2 \pm \text{MaBP}$ (结合表 1 给出表观年龄值进行误差分析, 其平均值为 $(2.1 \pm 0.8) \text{ Ma}$)左右有过一次断裂位错事件, 3 和 17 号样品采自后期右旋位错的断裂带中, 显示出在 5~6 MaBP(其平均值为 $(5.5 \pm 1.5) \text{ Ma}$), 有过一次快速断错加热后冷却事件, 但此次事件并未使磷灰石完全退火, 即当退火温度至 $80^\circ\sim 90^\circ\text{C}$ 时后保持一段平稳, 直至 $2 \pm \text{MaBP}$ 又发生再次冷却事件, 温度才接近地表温度状态. 值得注意的是, 11 和 15 号样品在 25~30 MaBP 快速冷却后, 经历一段长时间平稳, 温度保持在 $50\sim 60^\circ\text{C}$ 左右, 但达 5~6 MaBP 左右又有一次幅度较小的冷却事件.

上述资料表明, 红河断裂在距今 $(5.5 \pm 1.5) \text{ MaBP}$ 左右, 有一次突发性断裂位错事件. 联系到前述典型地质剖面分析, 应属右旋剪切活动性质, 而于 $(2.1 \pm 0.8) \text{ MaBP}$ 左右断裂再次活动且以正断位错为主. 与红河断裂带后期右旋位错事件相伴, 磷灰石的裂变径迹热历史同时反映出在 $(3.6\sim 3.8) \pm 0.6 \text{ MaBP}$ 和 $1.6\sim 2.3 \text{ MaBP}$ 有过 2 次山体快速隆升事件(图 7).

上述资料表明, 红河断裂带中新世以来经历过多次的断裂位错运动, 但在 (5.5 ± 1.5) 和 $2.1 \pm 0.8 \text{ MaBP}$ 左右的二期断裂位错运动是最为明显的二期断裂活动, 由于这些样品均直接采自右旋位错的断裂构造岩带, 因而是红河断裂右旋位错的年代.

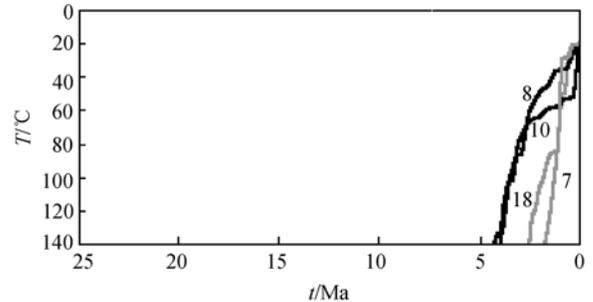


图 7 与山体隆升相关的裂变磷灰石径迹热年代史图
图中的样品号见表 2

4 结论与讨论

4.1 主要认识

综合上述地质分析和 FT 测年结果, 可以得出如下主要认识:

(1) 红河断裂带大规模右旋走滑运动发生在新世以后并可分为早、晚两期, 早期发生在中新世中晚期后上新世初期以前, 与这一期断裂活动相伴的是中新统的褶皱、隆升和断错变动; 晚期当发生在上新世末期与第四纪初, 与这一期断裂相关的是上新统的断错和上上新统粗面岩沿裂隙的侵位, 以及随后的第四纪伸展裂陷盆地和以正断为主的活动断裂广泛发育. 从断裂构造岩类型及伴随地层变形样式分析, 早期(中新世中晚期)断裂活动应以右旋剪切运动性质为主, 伴有一定的正断垂直落差; 后期(上新世末)的断裂活动以右旋正断运动性质为主.

(2) 根据地质分析并结合断裂构造岩带内磷灰石的 FT 测年结果, 初步得到红河断裂带后期大规模右旋走滑运动开始于 $(5.5 \pm 1.5) \text{ MaBP}$, 而 $(2.1 \pm 0.8) \text{ MaBP}$ 再次发生右旋正断活动, 这后一期的右旋正断活动一直延续至今.

4.2 问题讨论

红河断裂中南段元江一带的资料表明在元古界与中新统间的断层活动可能还存在一个时代更早的剪切活动事件, 这 2 个采样点均来自 Pt/N_1 间的挤压剪切构造岩带, 它们有可能表示中新世早期前后红河断裂断裂还经历过一次强烈的挤压剪切活动. 这一期的挤压剪切活动很可能是从左旋剪切到右旋剪

切的转换时代,这还有待深入研究。

红河断裂带大规模右旋走滑运动当与青藏高原快速隆升相伴的地壳块体南(偏东)向运动有关^[9,10,24],致于这种运动是地壳的大规模“挤出”或上地壳的“流动”?两者似无本质上的差别。但从红河断裂中新世末期以来右旋位错幅度仅 30 余公里^[24]分析,似不存在大规模的“挤出”。最近一些研究者从构造地质、岩石学和构造热年代学出发,对青藏高原东西向伸展构造的研究取得了很有意义的进展,且多数研究都倾向于这一东西向伸展开始于 8~4 Ma^[25~28]。我们的研究结果支持这一认识,并且支持青藏高原中新世以来东西的延伸可能有早、晚两期次。但这一伸展构造是由南北向挤压作用所致或是与高原垮塌有关则仍是有待进一步研究的问题。

致谢 对于林传勇、张秉良研究员在一些问题上给予的咨询和讨论,以及评审专家为改进本文提出的宝贵而有建设性的意见和建议,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 钟大赉, Tapponnier P, 吴海威, 等. 大型走滑断层-碰撞后陆内变形的形式. 科学通报, 1989, 34(7): 526—529
- 2 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(4): 289—295
- 3 陈文寄, 哈里轰 F M, 洛弗拉 O M. 哀牢山-红河剪切带的热年代学研究. 地震地质, 1992, 14(2): 122—128
- 4 Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H. The Ailao Shan Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 1990, 343: 431—437[DOI]
- 5 Harrison T M, Chen W, Leloup P H. An early Miocene Transition in deformation region with the Red River fault zone, Yunnan and its significance for Indo-Asian Tectonics. *J Geophys Res*, 1992, 97(135): 7559—7682
- 6 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. 科学通报, 1995, 40(16): 1497—1500
- 7 张进江, 李建清, 钟大赉, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造带的构造格局及其形成过程探讨. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(4): 373—383[摘要]
- 8 Schoenbohm L, Burchfiel B C, Chen L, et al. Pliocene up lift, River incision and faulting in the Red River region, Yunnan Province. *China Geophys Res Abs*, 2003, 6: 11678
- 9 Le Loup P H, Harrison T M, Ryerson F J, et al. Structural Petrological and thermal evolution of a tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. *J Geophys Res*, 1993, 98(84): 6715—6743
- 10 陈文寄, Harrison T M, Leloup P H, et al. 多重扩散模式与构造-热年代学研究. 国家地震局地质研究所编. 现今地球动力学研究及其应用. 北京: 地震出版社, 1994. 389—397
- 11 Laslett G M, Green P F, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission track in apatite. 2, A quantitative analysis. *Chemical Geology(Isotope Geoscience Section)*, 1987, 65: 1—13[DOI]
- 12 何科昭, 何浩生, 蔡红. 滇西造山带的形成与演化. 地质论评, 1996, 42(2): 47—106
- 13 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形. 地震地质, 2004, 26(4): 598—610
- 14 向宏发, 魏顺民, 徐锡伟, 等. 川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析. 地震地质, 2000, 22(3): 253—264
- 15 邓起东, 钟嘉猷, 马宗晋. 剪切破裂带的特征及其形成条件. 地质科学, 1996, (3): 227—237
- 16 魏顺民, 向宏发, 计凤桔, 等. 红河断裂带第四纪右旋走滑与尾端拉张转换关系研究. 地震地质, 1996, 18(4): 301—309
- 17 Wallace R E, Morris H T. Characteristic of faults and shear zone as seen in mine at depths as much as 2.5km below the surface, in U.S. Geological Survey open-file Report, 1979, 79—100
- 18 Robertson E C. Relationship of fault displacement to gouge and breccia thickness. *Mining Enginr*, 1983, 35
- 19 Galbraith R F. On statistical models for fission track counts. *Math Geol*, 1981, 13: 471—478[DOI]
- 向宏发. 红河活动断裂带第四纪断裂位错变化规律. 魏顺民编: 红河活动断裂带. 北京: 海洋出版社, 2001, 86—108
- 20 Gleadow A J W, Duddy I R. A natural log-term annealing experiment for apatite. *Nucl Tracks Radiat Meas*, 1981, 5: 169—174
- 21 Hurford A. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps, South Central Switzerland, and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 413—427[DOI]
- 22 Green P F, Duddy I R, Laslett G M, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4; Quantitative modeling techniques and extension to geological time scales. *Chem Geol*, 1989, 79: 155—182
- 23 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 红河断裂带大型右旋走滑运动定量研究的若干问题. 地球科学进展, 2004, 19(增刊): 56—59
- 24 万景林, 李齐, 陈文寄. 哀牢山-红河左旋走滑剪切带构造抬升的时间序列的裂变径迹证据. 地震地质, 1997, 19(1): 87—89
- 25 Yin A. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet Suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision. *J Geophys Res*, 2000, 105: 21745—21759[DOI]
- 26 王江海, 尹安, Harrison T M, 等. 青藏高原新生代两类高钾岩浆活动的热年代学研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(7): 529—537[摘要]
- 27 Wang E, Burchfiel B C, Chen L Z, et al. Late Cenozoic Xian Shuihe-Xiaojia, Red River and Dailifault Systems of Southwestern Sichuan and central Yunnan, China. *Geol Soc Am Bull*, 1998, 227: 1—108