

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.02.06

引用格式: 田鹏, 杨周胜, 喻聪俊, 等. 哀牢山—红河断裂带中南段新生代构造活动的年代学证据[J]. 中国地质调查, 2023, 10(2): 42–53. (Tian P, Yang Z S, Yu C J, et al. Chronological evidence of Cenozoic activity in the middle and southern part of Ailao Mountain–Red River fault zone [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(2): 42–53.)

哀牢山—红河断裂带中南段新生代构造活动的年代学证据

田鹏¹, 杨周胜¹, 喻聪俊², 孙滨³

(1. 云南省地震局, 云南昆明 650224; 2. 江西省地质调查勘查院地质环境监测所, 江西南昌 330000; 3. 昆明理工大学国土资源学院, 云南昆明 650031)

摘要: 运用同位素年代学研究哀牢山—红河断裂带的构造演化历史已获得众多成果, 但尚未有从低温—中温—高温系统的角度构建热演化史过程的研究, 断裂带左旋走滑的启动时间仍存在争议。总结了哀牢山—红河断裂带中南段的年龄数据, 通过分析认为相同同位素体系厘定的年龄值从南东端到北西端变新, 差异性减小; 将研究区分为北、中、南3段, 使用低温、中温、高温年龄构建时间—温度($T-t$)变化曲线, 热演化史表明断裂带经历了2期冷却历史, 冷却速率和隆升剥蚀速率的时空变化记录了伸展应力自南向北依次传播, 转换拉张强度在传递过程中逐渐减弱、断裂活动性明显减弱的过程; 将断裂带构造活动划分为快速左旋走滑阶段(35~20 Ma)、左旋走滑逐渐减弱阶段(20~6 Ma)及右旋走滑阶段(6 Ma至今)。断裂构造活动反映了印度—欧亚板块碰撞过程中, 青藏高原东南缘的应力持续调节过程。

关键词: 哀牢山—红河断裂带中南段; 同位素年龄; 构造—热演化史

中图分类号: P542; P533 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2023)02-0042-12

0 引言

哀牢山—红河断裂带作为印支板块与扬子板块的边界和印度—欧亚板块碰撞的东部边界^[1-3], 其构造演化特征一直是研究热点。研究哀牢山—红河断裂带的新生代活动对认识印度板块东构造结的运动轨迹、青藏高原东南缘构造格局的形成以及青藏高原隆升的变形机制与演化特征具有重要意义^[4-6]。

近年来, 前人对哀牢山—红河断裂带的物质组成、变质变形特征、岩石学特征、同位素年代学等方面开展了研究^[7-8], 已获得了断裂带内不同体系的年龄数据, 为更精确限定剪切带的剪切时限提供了

依据^[9-18]。断裂带新生代经历了多期构造变形, 早期为左旋走滑运动, 晚期转为右旋走滑运动^[19-23], 但左旋走滑运动的启动时间、左旋运动到右旋运动的转换时间、断裂带西北段和东南段构造演化的差异性等问题还存在争议。张进江等^[20]根据剪切带中不同矿物的⁴⁰Ar/³⁹Ar测年结果, 将左旋走滑运动分为3期, 并推测左旋走滑运动启动于58 Ma; 孙珍等^[21]基于红河断裂带的海上延伸带莺歌海盆地成盆机制的物理模拟实验, 认为在50 Ma断裂带进入缓慢左行平移阶段, 对应印度—欧亚板块的碰撞时间; Leloup等^[4]根据⁴⁰Ar/³⁹Ar测年结果, 认为断裂带中南段左旋走滑运动开始于27 Ma; Searle^[13]对比了变形花岗岩和未变形花岗岩的测年结果, 限定断裂带左旋走滑运动开始于21 Ma; 李宝龙

收稿日期: 2022-05-17; 修订日期: 2022-10-31。

基金项目: 云南省地震局青年基金项目“哀牢山—红河断裂带中段新生代活动性的年代学证据(编号: 2020K10)”和云南省重点研发计划(社会发展专项)“云南重大地震灾害及其灾害链综合风险评估技术与应用(编号: 202203AC100003)”联合资助。

第一作者简介: 田鹏(1988—), 女, 工程师, 主要从事地震地质研究工作。Email: 310235986@qq.com。

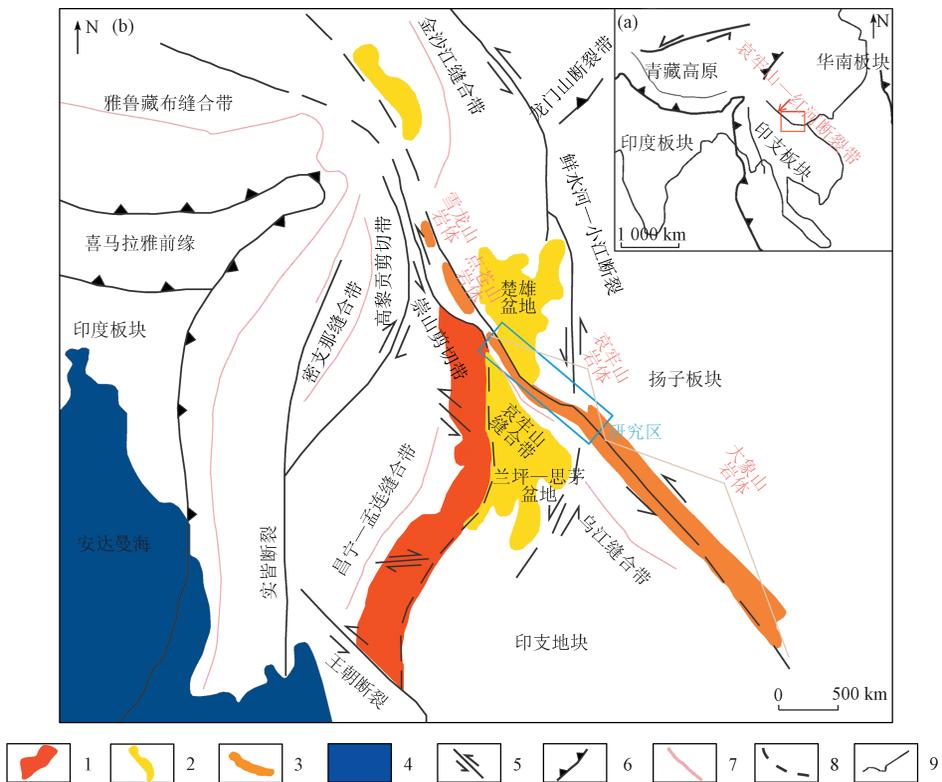
通信作者简介: 杨周胜(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测预报研究工作。Email: Yeayzs@qq.com。

等^[22]根据变形花岗岩中的锆石 U - Pb 年龄推测断裂活动开始于 30 Ma; 向宏发等^[23]测试了与断裂右旋运动相关的样品年龄,推测断裂带北中段右旋运动开始于 5.5 Ma; 翁少腾^[24]认为南段右旋走滑运动开始于 10 Ma。虽然前人在哀牢山—红河断裂带已获得了大量样品的同位素年龄数据,但未对哀牢山—红河断裂带从南东端到北西端的时空演化差异性特征开展系统研究,未从低温—中温—高温系统全面构建热史演化过程。

本文以哀牢山—红河断裂带中南段(直力—河口)为研究区,在前人研究基础上,构建了断裂带的时间—温度($T-t$)演化历史,厘定了哀牢山—红河断裂带中南段的新生代活动时限,分析不同区段时空演化的差异性特征及其对印度—欧亚板块碰撞演化的响应。

1 地质背景

哀牢山—红河断裂带是印度—欧亚大陆在碰撞过程中,具有应变吸收和调节作用的重要响应带^[25-26]。断裂带呈 NW—SE 向,北西端起始于云南洱源,南东端至河口附近进入越南境内。断裂带总长度达 1 000 km,云南境内约 600 km。根据几何结构和活动性差异,将断裂带中国境内部分划分为北段(洱源—弥渡)、中段(直力—大斗门)和南段(春元—河口)^[27-28]。沿断裂带自北向南发育 4 个变质岩体,依次为雪山山岩体、点苍山岩体、哀牢山岩体和越南境内的大象山岩体,研究区地处的哀牢山—红河断裂带中南段为哀牢山岩体(图 1)。



1. 三叠纪花岗岩; 2. 中生代沉积盆地; 3. 哀牢山—红河剪切带杂岩带; 4. 安达曼海; 5. 走滑断层剪切带; 6. 逆冲断层; 7. 缝合带; 8. 隐伏断层; 9. 断裂带

图 1 哀牢山—红河断裂带大地构造背景图(a)和研究区构造简图(b)^[5,29]

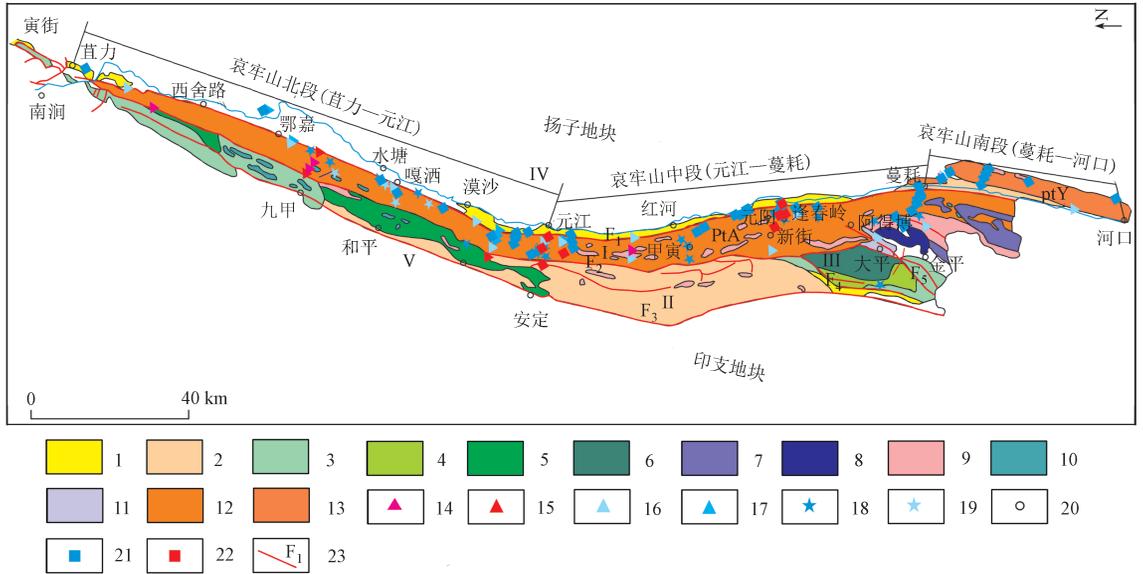
Fig. 1 Tectonic setting of Ailao Mountain - Red River shear zone(a) and tectonic sketch of the study area (b)^[5,29]

哀牢山岩体由哀牢山群和部分瑶山群变质岩系组成,哀牢山群变质岩呈条带状,长 350 km、宽 20 ~ 30 km,呈 NW—SE 向延伸(图 2),其东侧为红河断裂,西侧为哀牢山断裂,向北延伸被红河断裂所切,

在南涧县密低附近尖灭^[30]。哀牢山变质杂岩带由深变质带和浅变质带构成(图 3),红河断裂和哀牢山断裂之间为深变质带,变质程度为高绿片岩相—角闪岩相,部分地区可达高角闪岩相,其岩性主要为片麻

岩、角闪岩、大理岩等^[31],原岩发育糜棱岩化。哀牢山西侧为浅变质带,变质程度为绿片岩相,岩性主要为绢云板岩、千枚岩、变质硅质岩等^[32]。瑶山群变质

岩系位于哀牢山岩体东南端^[33],西部变质程度较低,为高绿片岩相,东部变质程度较高,达高角闪岩相,岩性主要为云母片岩、斜长角闪岩和大理岩^[34]。



- 1. 新生界; 2. 三叠系-白垩系; 3. 二叠系; 4. 中泥盆统-上石炭统; 5. 志留系; 6. 奥陶系; 7. 正长岩; 8. 二长岩; 9. 花岗岩; 10. 基性岩; 11. 闪长岩; 12. 元古界哀牢山群; 13. 元古界瑶山群; 14. 白云母年龄点位; 15. 绢云母年龄点位; 16. 黑云母年龄点位; 17. 角闪石年龄点位; 18. 锆石年龄点位; 19. 独居石年龄点位; 20. 地名; 21. FT 年龄点位; 22. (U-Th)/He 年龄点位; 23. 断层及编号;
- I. 哀牢山深变质带; II. 哀牢山缝合带; III. 金平裂丝带; IV. 楚雄盆地; V. 思茅盆地

图2 研究区地质简图

Fig.2 Geological sketch of the study area



图3 浅色花岗岩脉侵入深变质带(左)与浅变质带(右)野外露头照片

Fig.3 Field photos of the high - grade metamorphism (left) and low - grade metamorphism (right) intruded by leucogranite veins

2 哀牢山—红河断裂带年龄格架

本文总结了前人对哀牢山地区的测年成果,结

合低温—中温—高温体系年龄,根据哀牢山地区的变质峰期温压条件(640~780℃,400~700MPa)^[5],选择相对适宜的封闭温度,构建剪切带构造—热演化历史,封闭温度及年龄范围见表1。

表 1 哀牢山岩体同位素体系封闭温度及年龄区间

Tab. 1 Corresponding sealing temperatures of isotopic systems and ages of Ailao Mountain complex

同位素体系	封闭温度/°C	年龄区间/Ma
锆石 U - Pb	> 700 ^[35]	35 ~ 21 Ma ^[37-48]
独居石 Th - Pb	> 700 ^[35]	32 ~ 21 Ma ^[5,47]
角闪石 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	(535 ± 50) ^[36]	58 ~ 21 Ma ^[20,49-51]
黑云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	(335 ± 50) ^[36]	56.3 ~ 12.06 Ma ^[20,36,49-52]
白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	(375 ± 50) ^[36]	58.3 ~ 22.3 Ma ^[20]
绢云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	350 ^[36]	33.3 ~ 13.14 Ma ^[20]
磷灰石 FT	(110 ± 10) ^[35]	40 ~ 1 Ma ^[51,53-58]
磷灰石(U - Th)/He	75 ^[35]	17 ~ 10 Ma ^[56]

2.1 U(Th) - Pb 年龄

汇总哀牢山岩群变质岩中 U(Th) - Pb 年龄数据 29 个(图 4)。样品均采自深变质带内,大多经

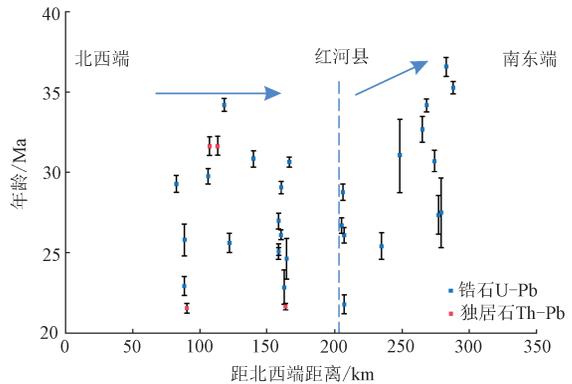
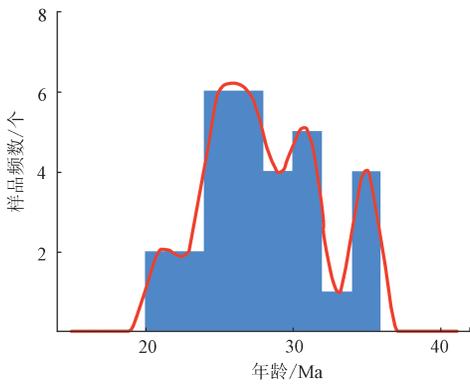


图 4 哀牢山岩体样品 U(Th) - Pb 同位素年龄直方图(左)与同位素年龄空间变化趋势(右)^[37-48]

Fig. 4 U(Th) - Pb ages histogram for Ailao Mountain complex (left) and spatial variation trend of isotopic ages (right)^[37-48]

2.2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄

哀牢山岩群变质岩中角闪石、黑云母、白云母以及绢云母矿物的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄数据共 40 个(图 5),采自浅变质带千糜岩中的绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar

历了变质、变形改造,受断裂带剪切作用影响,其年龄值可限定剪切作用的发生时间。研究区内发表的高温年龄主要集中于 35 ~ 21 Ma(图 4)^[37-49]。

将样品按采样位置从北西端到南东端依次投影在断裂带延伸方向(图 4)。断裂带样品位置分布均匀,年龄值集中于渐新世至晚中新世,沿断裂带从北西端至南东端,在红河县附近年龄值出现变大趋势。这一结果与宫伟等^[48]认为年龄值自南东向北西方向减小的结论一致。Lin 等^[47]认为哀牢山—红河断裂带样品的年龄值大小与样品位置没有明显关系,可能是由于其所测样品位于断裂带红河县以北,且样品数量少,未呈现出趋势变化特征。

测年样品有 3 个,其他样品均采集自深变质带内。变形特征显示岩石在变形过程中经历了明显的降温过程,而⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄指示了变形和变质的发生时间。测年数据中有 7 个样品的角闪石、黑云母、白云

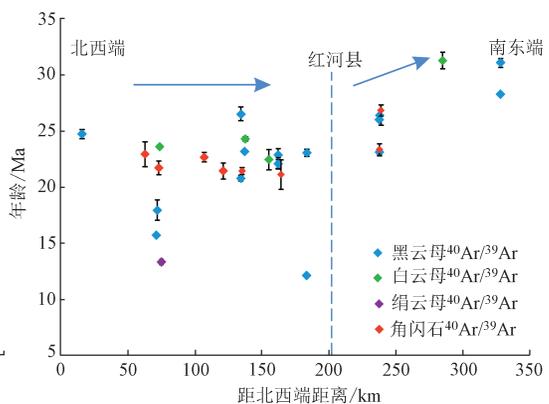
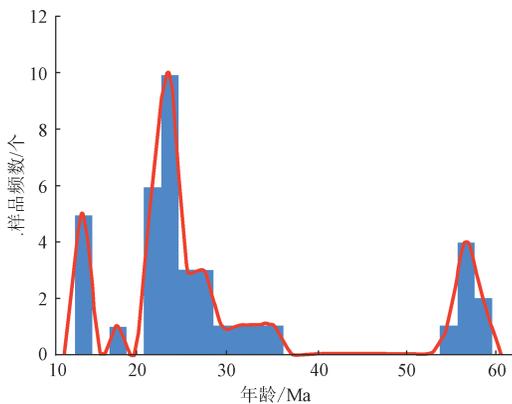


图 5 哀牢山岩体样品⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄直方图(左)与同位素年龄空间变化趋势(右)^[20,36,49-52]

Fig. 5 ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages histogram for Ailao Mountain complex (left) and spatial variation trend of isotopic ages (right)^[20,36,49-52]

母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄范围集中于 58 ~ 56 Ma。张进江等^[20]认为这组年龄代表哀牢山—红河断裂带第 1 期左行走滑运动开始的时间,但其他文献没有报道到此次事件,研究区内发表的中温年龄主要集中于 33 ~ 12 Ma(图 5)。

本文将深变质带内年龄范围为中新世—渐新世的样品沿断裂带延伸方向投影,变化趋势显示从北西端到南东端方向年龄值增大(图 5),且出现变化的位置与高温体系基本一致(红河县附近,图 4),变化幅度明显大于 U(Th) - Pb 同位素体系。浅变质带内样品数量过少,未显示出变化趋势。

2.3 FT 和 (U - Th)/He 年龄

变质岩中磷灰石 FT 和 (U - Th)/He 年龄数

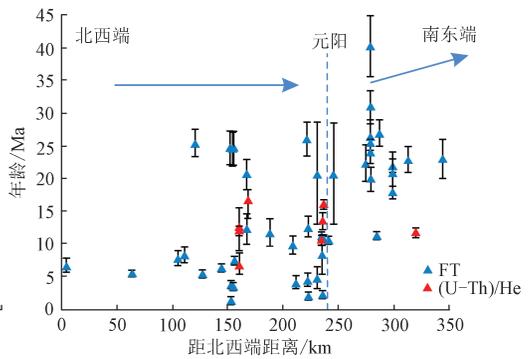
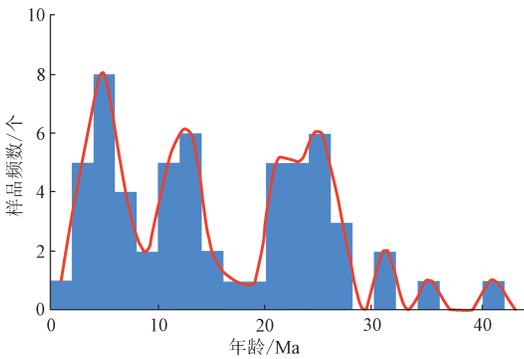


图 6 哀牢山岩体样品 FT 和 (U/Th)/He 同位素年龄直方图(左)与同位素年龄空间变化趋势(右)^[51,53-58]

Fig. 6 FT and (U - Th)/He Ar ages histogram for Ailao Mountain complex (left) and spatial variation trend of isotopic ages (right)^[51,53-58]

以上分析结果显示,所有同位素体系年龄值沿断裂带从北西端至南东端均出现变大趋势,变化量从高温体系到低温体系逐渐增大,变化出现位置从红河县向南部的元阳移动。

3 断裂带中南段热演化史结果

由于不同同位素体系、不同位置样品的年龄值存在明显差异,为更完整呈现哀牢山—红河断裂带中南段的构造—热史演化,本文将研究区从北西端到南东端划分为 3 段,即哀牢山北段(苴力—元江)、哀牢山中段(元江—蔓耗)和哀牢山南段(蔓耗—河口)^[58](图 2),计算冷却速率和剥蚀速率,分别构建样品 $T-t$ 变化曲线,其公式为冷却速率 = 矿物的封闭温度差/冷却年龄差,以及剥蚀速率 = 冷却速率/地温梯度。

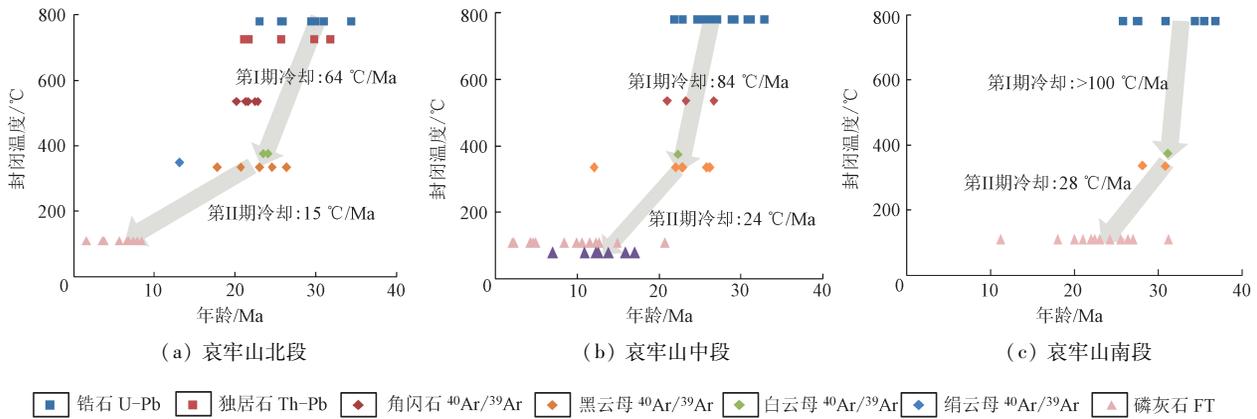
3.1 哀牢山北段(苴力—元江)

哀牢山北段主要变质峰期开始于 35 Ma, $T-t$

据共 59 个(图 6),其中哀牢山岩群变质岩的样品 51 个,瑶山岩群变质岩的样品 8 个,均采自深变质带内。向宏发等^[53]的野外观察和镜下微观特征显示,糜棱岩、片麻岩的年龄值指示了早期断裂带的左旋走滑运动,角砾岩、碎裂岩年龄值指示了后期右旋走滑运动,研究区内发表的低温体系 FT 和 (U - Th)/He 年龄数据主要集中于 28 ~ 2 Ma。

如图 6 所示,样品 FT 和 (U - Th)/He 年龄值沿断裂带延伸方向的变化趋势同 U(Th) - Pb 和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素体系整体一致,从北西端至南东端方向增大趋势明显,不同之处为发生变化位置的向南移动,至元阳附近(红河县以南)变化量最大。

曲线(图 7(a))显示区域经历了 2 个快速冷却阶段:哀牢山变质岩体的锆石 U - Pb 年龄、独居石 Th - Pb 年龄以及角闪石、云母类矿物的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄共同构成了第 I 期快速冷却阶段(35 ~ 20 Ma),锆石 U - Pb 年龄封闭温度(780 °C)和黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄封闭温度(335 °C)相差约 445 °C,估算平均冷却速率为 64 °C/Ma,假设地温梯度为 30 °C/km^[59],则哀牢山岩体隆升剥蚀(或构造剥露)速率为 2.13 mm/a,快速冷却可能代表发生了变形事件,说明样品在 35 ~ 20 Ma 经历了强烈变形;云母类矿物 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄和磷灰石 FT 年龄共同构成了第 II 期快速冷却阶段(20 ~ 7 Ma),估算平均冷却速率为 15 °C/Ma,平均隆升剥蚀(或构造剥露)速率为 0.5 mm/a,冷却速率和剥蚀速率明显减弱,表明 20 ~ 7 Ma 断裂带活动开始减弱。根据右旋活动带内构造岩样品的测年结果,右旋运动开始于约 4 Ma。

图 7 哀牢山岩体时间-温度($T-t$)变化曲线Fig. 7 $T-t$ change curve of Ailao Mountain complex

3.2 哀牢山中段(元江—蔓耗)

哀牢山中段主要变质峰期开始于 32 Ma, 与北段同样经历了 2 个快速冷却阶段(图 7(b))。哀牢山变质岩体的锆石 U-Pb 年龄、角闪石和云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄共同构成了第 I 期快速冷却阶段(32 ~ 22 Ma), 估算平均冷却速率为 84 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 平均隆升剥蚀(构造剥露)速率为 2.8 mm/a; 云母类矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、磷灰石 FT 及 (U-Th)/He 年龄共同构成了第 II 期快速冷却阶段(22 ~ 10 Ma), 估算平均冷却速率为 24 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 隆升剥蚀速率为 0.8 mm/a。哀牢山中段的 2 期快速冷却历史与北段对应, 时间上几乎重合, 冷却速率和剥蚀速率明显增加。根据右旋活动带内构造岩样品的测年结果, 右旋运动开始于约 12 Ma, 早于哀牢山北段。

3.3 哀牢山南段(蔓耗—河口)

哀牢山南段由哀牢山变质岩体和部分瑶山群变质岩体组成。主要变质峰期开始于 35 Ma, $T-t$ 曲线显示(图 7(c)) 区域经历了 2 个快速冷却阶段。锆石 U-Pb 年龄、云母类矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄构成第 I 期快速冷却阶段(35 ~ 28 Ma), U-Pb 年龄与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄完全重合, 表明样品穿过 780 $^{\circ}\text{C}$ 等温面的时间和穿过 335 $^{\circ}\text{C}$ 等温面的时间一致, 属于极速冷却过程, 估算平均冷却速率约 445 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 隆升剥蚀(构造剥露)速率为 14.8 mm/a; 云母类矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、磷灰石 FT 年龄共同构成了第 II 期快速冷却阶段(28 ~ 22 Ma), 估算平均冷却速率为 28 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 隆升剥蚀(构造剥露)速率为 0.93 mm/a。与北段和中段相比, 哀牢山南段的冷却速率和剥蚀速率更大, 冷却历史结束时间更短。

本文未收集到南段右旋活动带内样品的 FT 测年结果, 目前无法判断右旋运动的启动时间。根据翁少腾^[24] 的野外调查研究, 在约 10 Ma 以来, 在瑶山杂岩西侧红河断裂附近形成了小型右行韧性剪切带, 并在局部形成破碎带, 随后又发生多期右旋走滑运动。

年龄数据显示哀牢山—红河断裂带中南段的构造活动启动时间基本一致, 随着断裂活动的持续, 从南东端到北西端差异逐步加大, 从南到北隆升剥蚀速率变小, 南端的快速隆升期持续至中新世, 北端持续至更新世。

4 讨论

4.1 哀牢山—红河断裂带中南段热历史演化

哀牢山—红河断裂带中南段的北段、中段和南段的 2 期冷却历史基本对应。剪切带变质岩的锆石、独居石 U(Th)-Pb 测年结果指示新生代变质作用主体自 35 Ma 开始, 与研究区内断裂带的左行走滑运动启动时间基本同步。第 I 期快速冷却指示了强变形的发生时间, 南段的大规模左行走滑运动发生时间早于中段和北段; 第 II 期快速冷却指示断裂带左旋剪切运动逐渐减弱, 哀牢山岩体南段的快速隆升最先结束, 部分磷灰石的 FT 年龄和 (U-Th)/He 年龄记录了南段的右旋剪切运动开始于约 10 Ma, 北段开始于约 4 Ma, 表明断裂带在左旋剪切运动后又经历了右旋剪切运动。2 期快速冷却结束后, 岩体进入缓慢稳定的隆升期, 但断裂带构造活动一直未停止。

4.2 哀牢山—红河断裂带构造活动性特征

热年代学年龄显示哀牢山—红河断裂带中

南段左旋走滑运动的启动时间基本一致。在第 I 期冷却过程中断裂带活动性增强直至最大,表现为哀牢山岩体快速隆升,随着断裂带构造活动的持续,活动性在不同位置强度不同,表现为南北两端的冷却速率和隆升剥蚀速率存在明显差异,且运动越往南部差异越大(北段 2.13 mm/a、中段 2.8 mm/a、南段 14.8 mm/a);第 II 期冷却过程中断裂带活动强度逐渐减弱,隆升剥蚀速率较前期明显降低(北段 0.5 mm/a、中段 0.8 mm/a、南段 0.93 mm/a),与第 I 期相比南北两端差异性减小。2 期快速冷却结束后,岩体进入缓慢稳定的隆升期,断裂带由左旋剪切运动转变为右旋剪切运动,转换时间从南到北逐渐变晚。断裂带构造演化史记录了区域伸展应力自南向北依次传播、转换拉张强度在传递过程中逐渐减弱、断裂活动性从强到弱的过程。

哀牢山—红河断裂带中南段的构造活动具有以下特征:①断裂带左旋剪切运动开始于早渐新世,在晚渐新世活动性达到最强,且南端的活动性大于北端;②至早中新世,断裂带活动性开始减弱但并未停止;③晚中新世至上新世,断裂带转变为右旋剪切运动,活动强度小于前期左旋剪切运动。活动性变化体现了断裂带不同位置、不同时间产生的不同应力体制和应变方式。

4.3 哀牢山—红河断裂带构造活动对区域地质演化的响应

印度—欧亚板块的碰撞与后碰撞演化早期为正向碰撞,持续汇聚后转为侧向碰撞与斜向俯冲,区域上岩石圈和板块向南东顺时针旋转逃逸^[10],对藏东南地区构造应力场形成直接制约,哀牢山—红河断裂带构造活动响应了区域构造演化,完整记录了应力场的变化过程(图 8)。

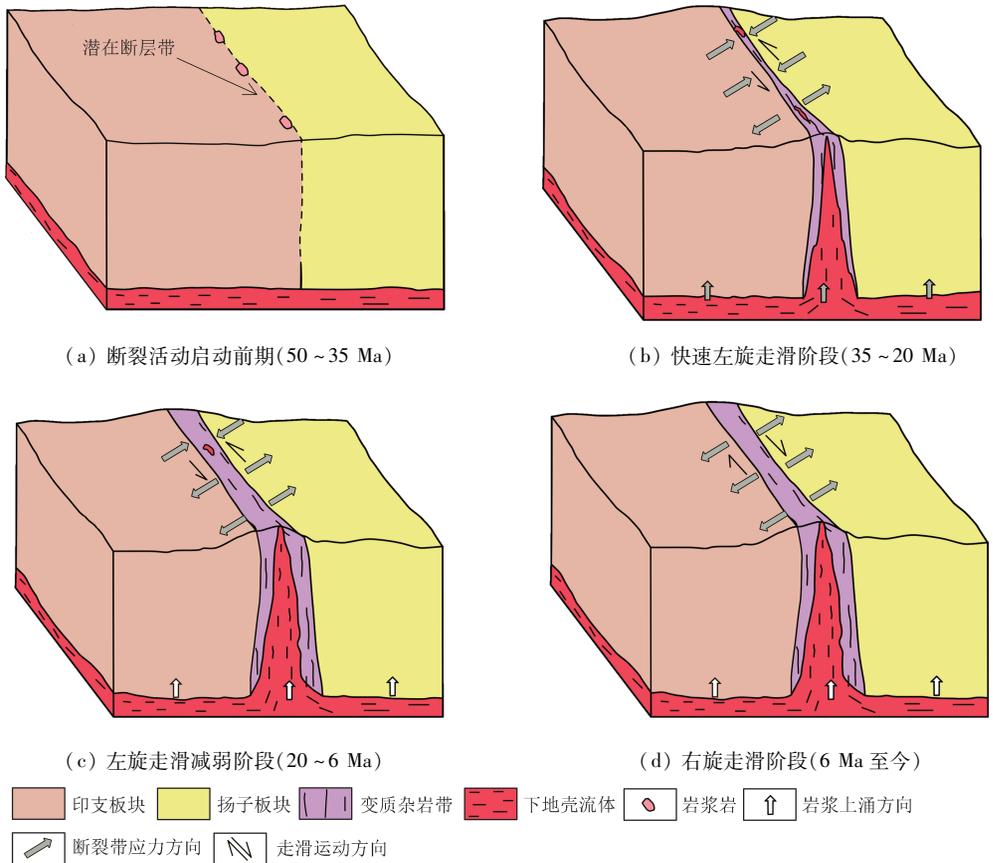


图 8 哀牢山—红河断裂带新生代应力变化^[29]

Fig. 8 Changes of Cenozoic stress in Ailao Mountain - Red River fault zone^[29]

4.3.1 断裂活动启动前期 (50 ~ 35 Ma)

印度板块和欧亚板块的碰撞发生于约 50 Ma^[60],板块初始碰撞并未引发哀牢山—红河断

裂带的构造运动,挤压应力可能并未集中在哀牢山地区。随着印度板块的向北持续推挤,应力逐渐向东北方向传播,板块东侧边界受到挤压应力控制,

印支板块沿哀牢山—红河断裂与实皆断裂向东南逃逸,运动方向发生顺时针旋转(图8(a))。哀牢山地区发生伸展运动,表现为有富钾碱性岩浆活动(约35 Ma)^[61]。

4.3.2 快速左旋走滑阶段(35~20 Ma)

此阶段印度板块持续顺时针旋转,挤压应力推动哀牢山—红河断裂带启动了大规模左行走滑运动,在哀牢山地区的不同位置启动时间基本一致(约35 Ma),断裂带上表现出高温剪切特征,藏东南地区整体上从南到北断裂活动启动时间逐渐变晚。在持续推挤过程中,左行走滑运动加快,构造活动调节区域应力,印支板块沿断裂带向南被顺时针旋转挤出,部分压力释放,应力场发生变化,断裂带北西端仍为挤压应力,南东端转变为伸展应力,构造活动逐步呈现出差异性,表现为隆升剥蚀速率从南到北逐渐减小。在此阶段,断裂带深入到地壳深部,糜棱岩沿断裂带发育,大量下地壳物质快速、不均匀地涌入地表,剪切带内可见同剪切的浅色花岗岩脉侵入体^[62-63]。

4.3.3 左旋走滑减弱阶段(20~6 Ma)

随着印支板块旋转挤出,伸展作用向北传递,此阶段哀牢山—红河断裂带左旋走滑运动逐渐变弱,隆升剥蚀速率较前期明显变小,但仍处于快速隆升期。青藏高原晚期EW向伸展作用(<20 Ma)引起高原内中地壳和下地壳物质向东南流动^[64],流入哀牢山地区引起地表被动抬升。其对区域隆升剥蚀的影响大于构造活动的作用,因此虽然研究区断裂活动减弱,隆升剥蚀依旧快速。此时断裂带南东端已开始右旋走滑运动。

4.3.4 右旋走滑阶段(6 Ma至今)

此阶段印支地块旋转仍在持续,伸展作用传递到断裂带以北区域,哀牢山地区为拉张区域,加厚的地壳持续伸展塌陷,断裂带大规模转为右旋走滑运动,进一步调节着印度—欧亚板块的碰撞作用,哀牢山岩体从南到北逐渐开始缓慢隆升。

5 结论

(1) 哀牢山—红河断裂带中南段(直力—河口)不同矿物体系的年龄数据显示,锆石和独居石U(Th)-Pb年龄主要集中于35~21 Ma,角闪石和云母类矿物⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄主要集中于33~12 Ma,磷灰石FT年龄和(U-Th)/He年龄主要集中于

28~2 Ma,断裂带整体呈现出从南东端到北西端样品年龄逐渐变新的特征。

(2) 哀牢山—红河断裂带中南段样品T-t变化曲线显示研究区经历了2期快速冷却过程,构造演化历史显示断裂带构造活动具有分阶段和区域性的特征。左旋走滑运动开始于35 Ma,渐新世断裂带活动性增强并达到最大,早中新世断裂带活动性逐渐减弱但并未停止,晚中新世至上新世断裂带转变为右旋走滑运动。研究区内断裂带构造活动的启动时间一致,之后区域差异逐渐明显,活动性从南东端至北西端逐渐减弱。

(3) 印度—欧亚板块碰撞初期未引起研究区断裂带的构造运动。印度板块向东北持续推挤,并伴随印支板块顺时针旋转东南向逃逸,引发哀牢山地区断裂带不同位置的左行剪切运动同时启动。应力的变化转变为南端拉张,北端挤压,构造活动性从南到北减弱。随着印支地块的旋转,伸展作用继续向北端传递,直至研究区均处于拉张区域,断裂带转为右旋走滑运动。断裂带构造-热演化史记录了印度—欧亚板块碰撞过程中青藏高原东南缘应力持续调节的过程。

参考文献(References):

- [1] Tapponnier P, Molnar P. Slip - line field theory and large - scale continental tectonics[J]. Nature, 1976, 264(5584): 319 - 324.
- [2] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo P. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. Geol Soc, Lond, Spec Publ, 1986, 19: 113 - 157.
- [3] 张进江, 钟大赉, 周勇. 东南亚及哀牢山红河构造带构造演化的讨论[J]. 地质论评, 1999, 45(4): 337 - 344.
Zhang J J, Zhong D L, Zhou Y. Tectonic evolution of southeast Asia and the Ailao - Honghe tectonic belt[J]. Geol Rev, 1999, 45(4): 337 - 344.
- [4] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan - Red River shear zone, SE Asia[J]. J Geophys Res, 2001, 106(B4): 6683 - 6732.
- [5] Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, et al. Direct dating of left - lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam[J]. J Geophys Res, 2003, 108(B2): 2127.
- [6] Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post - collisional magmatism[J]. Earth - Sci Rev, 2005, 68(3/4): 173 - 196.
- [7] Chung S L, Cheng H, Jahn B M, et al. Major and trace element, and Sr - Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening[J].

- Lithos,1997,40(2/3/4):203-220.
- [8] Chen X Y,Liu J L,Tang Y, et al. Contrasting exhumation histories along a crustal - scale strike - slip fault zone:The Eocene to Miocene Ailao Shan - Red River shear zone in southeastern Tibet[J]. *J Asian Earth Sci*,2015,114:174-187.
- [9] 杨振宇,孙知明,马醒华,等. 红河断裂两侧早第三纪古地磁研究及其地质意义[J]. *地质学报*,2001,75(1):35-44.
Yang Z Y,Sun Z M,Ma X H, et al. Palaeomagnetic study of the Early Tertiary on both sides of the Red River fault and its geological implications[J]. *Acta Geol Sin*,2001,75(1):35-44.
- [10] 刘俊来,宋志杰,曹淑云,等. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例[J]. *岩石学报*,2006,22(4):775-786.
Liu J L,Song Z J,Cao S Y, et al. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates; Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet[J]. *Acta Petrol Sin*,2006,22(4):775-786.
- [11] Deng J, Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework [J]. *Gondwana Res*,2016,36:219-274.
- [12] Zhang J,Wang H,Li S H, et al. Paleogene magmatism and gold metallogeny of the Jinping terrane in the Ailaoshan ore belt, Sanjiang Tethyan Orogen (SW China): Geology, deposit type and tectonic setting[J]. *Ore Geol Rev*,2017,91:620-637.
- [13] Searle M P. Role of the Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia [J]. *J Geol Soc*, 2006,163(6):1025-1036.
- [14] Searle M P, Yeh M W, Lin T H, et al. Structural constraints on the timing of left - lateral shear along the Red River shear zone in the Ailao Shan and Diancang Shan Ranges, Yunnan, SW China [J]. *Geosphere*,2010,6(4):316-338.
- [15] Leloup P H, Lacassin B, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan - Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251 (1/2/3/4): 3 - 10, 13 - 84.
- [16] 王二七,樊春,王刚,等. 滇西哀牢山一点苍山形成的构造和地貌过程[J]. *第四纪研究*,2006,26(2):220-227.
Wang E Q,Fan C,Wang G, et al. Deformational and geomorphic processes in the formation of the Ailao Shan - Diancang range, west Yunnan [J]. *Quat Sci*,2006,26(2):220-227.
- [17] 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[J]. *地球科学进展*,2004,19(S1):56-59.
Xiang H F,Han Z J,Guo S M, et al. Processing about quantitative study of large - scale strike - slip movement on red river fault zone [J]. *Adv Earth Sci*,19(S1):56-59.
- [18] Cao S Y,Liu J L,Leiss B, et al. Oligo - Miocene shearing along the Ailao Shan - Red River shear zone: Constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China [J]. *Gondwana Res*, 2011,19(4):975-993.
- [19] Tang Y,Liu J L,Tran M D, et al. Timing of left - lateral shearing along the Ailao Shan - Red River shear zone: Constraints from zircon U - Pb ages from granitic rocks in the shear zone along the Ailao Shan Range, Western Yunnan, China [J]. *Int J Earth Sci*, 2013,102(3):605-626.
- [20] 张进江,钟大赉,桑海清,等. 哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据[J]. *地质科学*,2006,41(2):291-310.
Zhang J J,Zhong D L,Sang H Q, et al. Structural and geochronological evidence for multiple episodes of deformation since paleocene along the Ailao Shan - red river shear zone, southeastern Asia [J]. *Chin J Geol*,2006,41(2):291-310.
- [21] 孙珍,钟志洪,周蒂,等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J]. *热带海洋学报*,2003,22(2):1-9.
Sun Z,Zhong Z H,Zhou D, et al. Deformation mechanism of Red River fault zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai basin formation [J]. *Journal of Tropical Oceanography*,2003,22(2):1-9.
- [22] 李宝龙,季建清,付孝悦,等. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系变质时限研究[J]. *岩石学报*,2009,25(3):595-608.
Li B L, Ji J Q, Fu X Y, et al. Metamorphic time limits study on the metamorphic rocks series of Ailao Shan - Diancang Mountain Ranges, west Yunnan [J]. *Acta Petrol Sin*,2009,25(3):595-608.
- [23] 向宏发,万景林,韩竹军,等. 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 [J]. *中国科学 D 辑 地球科学*,2006,36(11):977-987.
Xiang H F,Wan J L,Han Z J, et al. Geological analysis and FT dating of the large - scale right - lateral strike - slip movement of the Red River Fault zone [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*,2006,50(3):331-342.
- [24] 翁少腾. 滇西瑶山变质杂岩新生代变形特征及区域构造热演化讨论 [D]. 北京:中国地质大学,2014.
Weng S T. Cenozoic deformation Characteristics and Regional Tectonic Thermal Evolution Discussion of Yaoshan Metamorphic Complex in the West of Yunnan [D]. Beijing: China University of Geosciences,2014.
- [25] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带 [M]. 北京:科学出版社,1998.
Zhong D L. Paleotethysides in Western Yunnan and Sichuan [M]. Beijing: Science Press,1998.
- [26] 刘俊来,王安建,曹殿华,等. 三江造山带后碰撞断裂构造带的结构与演化:以新生代剑川-兰坪盆地为例[J]. *高校地质学报*,2004,10(4):488-499.
Liu J L,Wang A J,Cao D H, et al. Structure and evolution of the Post - Collisional Fault structures in the Three River Orogenic belt, exemplified by the cenozoic Jianchuan - Lanping Basin [J]. *Geol J China Univ*,2004,10(4):488-499.
- [27] 魏顺民,计凤桔,向宏发,等. 红河活动断裂带 [M]. 北京:海洋出版社,2001.

- Guo S M, Ji F J, Xiang H F, et al. The Honghe Active Fault Zone[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2001.
- [28] 李西, 冉勇康, 陈立春, 等. 红河断裂带南段全新世地震活动证据[J]. 地震地质, 2016, 38(3): 596–604.
- Li X, Ran Y K, Chen L C, et al. The Holocene seismic evidence on southern segment of the Red River fault zone[J]. Seismol Geol, 2016, 38(3): 596–604.
- [29] 史鹏亮. 三江构造带新生代变形构造的时空变化——对大陆碰撞过程的制约[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- Shi P L. Temporal and Spatial Variation in the Cenozoic Deformation Patterns of the Sanjiang Orogenic Belt: Constraint on the India – Eurasia Continent – continent Collision[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [30] 王义昭, 丁俊. 云南哀牢山中深变质岩系构造变形特征及演变[J]. 特提斯地质, 1996(20): 52–69.
- Wang Y Z, Ding J. Structural deformation and evolution of the Medium – to High – Grade metamorphic rock series in the Ailao Mountains, Yunnan[J]. Tethyan Geol, 1996(20): 52–69.
- [31] Liu J L, Chen X Y, Wu W B, et al. New tectono – geochronological constraints on timing of shearing along the Ailao Shan – Red River shear zone: Implications for genesis of Ailao Shan gold mineralization[J]. J Asian Earth Sci, 2015, 103: 70–86.
- [32] 胡长寿. 云南哀牢山岩群中深变质岩系中矽线石的初步研究[J]. 云南地质, 1996, 15(3): 293–298.
- Hu C S. A preliminary study of the sillimanites in the Medium – Deep metamorphic rocks of the Ailaoshan rock group, Yunnan[J]. Yunnan Geol, 1996, 15(3): 293–298.
- [33] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. Regional Geology Annals of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [34] 廖震, 刘玉平, 李正祥, 等. 滇东南瑶山群 SHRIMP 锆石 U – Pb 年代学及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(2): 154–162.
- Liao Z, Liu Y P, Li Z X, et al. Zircon SHRIMP U – Pb Geochronology of the Yaoshan Group, Southeastern Yunnan, China and its geological significance[J]. Bull Mineral, Petrol Geochem, 2014, 33(2): 154–162.
- [35] 吴元保, 李献华. 同位素地质年代学基本原理和方法[M]//丁仲礼. 固体地球科学研究方法. 北京: 科学出版社, 2013: 479–493.
- Wu Y B, Li X H. Basic principles and methods of isotope geochronology[M]//Ding Z L. Solid Earth Science Research Methods. Beijing: Science Press, 2013: 479–493.
- [36] Harrison T M, McDougall I. Excess⁴⁰Ar in metamorphic rocks from Broken Hill, New South Wales: Implications for ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra and the thermal history of the region[J]. Earth Planet Sci Lett, 1981, 55(1): 123–149.
- [37] 郭小飞. 哀牢山构造带白垩纪以来的岩浆与变质作用及其大地构造指示[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2017.
- Guo X F. Magmatic and Metamorphic Records of the Ailaoshan Tectonic Belt Since Cretaceous and Their Tectonic Implications[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [38] 冀磊, 刘福来, 王舫, 等. 点苍山—哀牢山杂岩带多期变质作用: 嘎洒地区变沉积岩锆石微量元素与 U – Pb 年代学制约[J]. 岩石学报, 2017, 33(2): 605–621.
- Ji L, Liu F L, Wang F, et al. Ployphase metamorphism in Diancang Shan – Ailao Shan complex zone: Constraints from U – Pb dating and trace elements of zircons in metasedimentary rocks, Gasa area[J]. Acta Petrol Sin, 2017, 33(2): 605–621.
- [39] 李宝龙, 季建清, 王丹丹, 等. 滇南新元古代的岩浆作用: 来自瑶山群深变质岩 SHRIMP 锆石 U – Pb 年代学证据[J]. 地质学报, 2012, 86(10): 1584–1591.
- Li B L, Ji J Q, Wang D D, et al. Neoproterozoic magmatism in south Yunnan: Evidence from SHRIMP zircon U – Pb geochronological results of High – grade metamorphic rocks in the Yaoshan group[J]. Acta Geol Sin, 2012, 86(10): 1584–1591.
- [40] 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 等. 滇西点苍山—哀牢山变质岩系锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2322–2330.
- Li B L, Ji J Q, Fu X Y, et al. Zircon SHRIMP dating and its geological implications of the metamorphic rocks in Ailao Shan – Diancang Mountain Ranges, west Yunnan [J]. Acta Petrol Sin, 2008, 24(10): 2322–2330.
- [41] 陈玮, 刘俊来, 樊文魁, 等. 哀牢山—红河剪切带中段多阶段新生代花岗岩脉: 同位素年代学及对于剪切应变型式转变时间的约束[J]. 岩石学报, 2018, 34(5): 1347–1358.
- Chen W, Liu J L, Fan W K, et al. Multiple stages of granitic dykes along the Ailao Shan – Red River shear zone: Constraints on timing of switch of shear strain types [J]. Acta Petrol Sin, 2018, 34(5): 1347–1358.
- [42] 林清茶, 夏斌, 张玉泉, 等. 哀牢山—金沙江碱性岩带南段云南金平八一村钾质碱性花岗岩锆石 SHRIMP U – Pb 年龄[J]. 地质通报, 2005, 24(5): 420–423.
- Lin Q C, Xia B, Zhang Y Q, et al. Zircon SHRIMP dating of the Bayicun potassic alkali – granite, Jinping, Yunnan, in the southern segment of the Ailaoshan – Jinshajiang alkaline rock belt[J]. Geol Bull China, 2005, 24(5): 420–423.
- [43] 唐渊, 尹福光, 王立全, 等. 滇西崇山剪切带南段左行走滑作用的构造特征及时代约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1311–1324.
- Tang Y, Yin F G, Wang L Q, et al. Structural characterization of and geochronological constraints on sinistral strike – slip shearing along the southern segment of Chongshan shear zone, western Yunnan[J]. Acta Petrol Sin, 2013, 29(4): 1311–1324.
- [44] 王冬兵, 唐渊, 廖世勇, 等. 滇西哀牢山变质岩系锆石 U – Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1261–1278.
- Wang D B, Tang Y, Liao S Y, et al. Zircon U – Pb dating and its

geological implications of the metamorphic rock series in Ailao Shan Ranges, western Yunnan[J]. *Acta Petrol Sin*, 2013, 29(4): 1261 – 1278.

[45] 王明亮, 张加桂, 汪新文. 滇西哀牢山构造带变质岩系 LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2016, 35(5): 738 – 749.

Wang M L, Zhang J G, Wang X W. LA – ICP – MS zircon U – Pb dating of the metamorphic rocks in the Ailaoshan tectonic belt, western Yunnan, and its geological implications [J]. *Geol Bull China*, 2016, 35(5): 738 – 749.

[46] 武精凯, 赵志丹, 杨逸云, 等. 云南哀牢山—红河断裂带南段新生代富碱斑岩岩石成因和地质意义[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 485 – 504.

Wu J K, Zhao Z D, Yang Y Y, et al. Petrogenesis and geological implications of the alkali – rich porphyry in southern Ailaoshan – Red River shear zone[J]. *Acta Petrol Sin*, 2019, 35(2): 485 – 504.

[47] Lin T H, Chung S L, Chiu H Y, et al. Zircon U – Pb and Hf isotope constraints from the Ailao Shan – Red River shear zone on the tectonic and crustal evolution of southwestern China[J]. *Chem Geol*, 2012, 291: 23 – 37.

[48] 宫伟, 姜效典. 哀牢山—红河断裂带哀牢山—大象山段渐新世—早中新世热史演化及成因[J]. *地球科学*, 2017, 42(2): 223 – 239.

Gong W, Jiang X D. Thermal evolution history and its genesis of the Ailao Shan – Red River Fault Zone in the Ailao Shan and Day Nui Con voi massif during Oligocene – Early Miocene [J]. *Earth Sci*, 2017, 42(2): 223 – 239.

[49] 陈文寄, T M 哈里森, O M 洛弗拉. 哀牢山—红河剪切带的热年代学研究——多重扩散域模式的应用实例[J]. *地震地质*, 1992, 14(2): 121 – 128.

Chen W J, Harrison T M, Lovera O M. Thermochronology of the Ailaoshan – Red River Shear zone – a case study of multiple diffusion domain model[J]. *Seismol Geol*, 1992, 14(2): 121 – 128.

[50] Wang J H, Yin A, Harrison M T, et al. Thermochronological constraints on two pulses of Cenozoic high – K magmatism in eastern Tibet[J]. *Sci China Series D: Earth Sci*, 2003, 46(7): 719 – 729.

[51] 李齐, 陈文寄, 万景林, 等. 哀牢山—红河剪切带构造抬升和运动形式转换时间的新证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(6): 576 – 583.

Li Q, Chen W J, Wan J L, et al. New evidence of tectonic uplift and transform of movement style along Ailao shan – Red River shear zone[J]. *Sci China Series D: Earth Sci*, 2001, 44(2): 124 – 132.

[52] 李宝龙, 季建清, 罗清华, 等. 滇西点苍山—哀牢山隆升构造样式和隆升时限[J]. *地震地质*, 2012, 34(4): 696 – 712.

Li B L, Ji J Q, Luo Q H, et al. The structural style and timing of uplift of the Ailaoshan – Diancang range, west Yunnan, China [J]. *Seismol Geol*, 2012, 34(4): 696 – 712.

[53] 向宏发, 毓顺民, 张晚霞, 等. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错的定量研究[J]. *地震地质*, 2007, 29(1): 34 – 50.

Xiang H F, Guo S M, Zhang W X, et al. Quantitative study on the large scale dextral strike – slip offset in the southern segment of the Red River Fault since Miocene [J]. *Seismol Geol*, 2007, 29(1): 34 – 50.

[54] 万景林, 李齐, 陈文寄. 哀牢山—红河左旋走滑剪切带构造抬升时间序列的裂变径迹证据[J]. *地震地质*, 1997, 19(1): 87 – 90.

Wan J L, Li Q, Chen W J. Fission track evidence of diachronic uplift along the Ailao shan – Red River left – lateral strike – slip shear zone [J]. *Seismol Geol*, 1997, 19(1): 87 – 90.

[55] 张秉良, 刘瑞珣, 向宏发, 等. 红河断裂带中南段断层岩 FT 测年及其地质意义[J]. *地震地质*, 2009, 31(1): 44 – 56.

Zhang B L, Liu R X, Xiang H F, et al. FT dating of fault rocks in the central – southern section of the Red River Fault zone and its geological implications [J]. *Seismol Geol*, 2009, 31(1): 44 – 56.

[56] Wang Y, Zhang B, Schoenbohm L M, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ailao Shan – Red River fault (SE Tibet): Implications for kinematic change during plateau growth [J]. *Tectonics*, 2016, 35(8): 1969 – 1988.

[57] 陈小宇, 刘俊来, 翁少腾. 滇西瑶山杂岩变形特征与新生代剥露隆升的磷灰石裂变径迹证据[J]. *岩石学报*, 2016, 32(8): 2303 – 2316.

Chen X Y, Liu J L, Weng S T. Deformation characteristics and Cenozoic exhumation of the Yao shan complex evidenced by apatite fission track thermochronology [J]. *Acta Petrol Sin*, 2016, 32(8): 2303 – 2316.

[58] 任龙龙, 张波, 郑德文, 等. 哀牢山—红河剪切带渐新世的构造体制转换与剥露历史: 来自哀牢山南段磷灰石裂变径迹的证据[J]. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1787 – 1802.

Ren L L, Zhang B, Zheng D W, et al. Tectonic transformation and its exhumation history of the Ailao Shan – Red River shear zone in Oligocene: evidences from apatite fission track thermochronology of the southern segment of the Ailao Shan range [J]. *Acta Petrol Sin*, 2020, 36(6): 1787 – 1802.

[59] Yuan Y S, Ma Y S, Hu S B, et al. Present – day geothermal characteristics in south China [J]. *Chin J Geophy*, 2006, 49(4): 1005 – 1014.

[60] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of southeast Asia [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1 – 4): 85 – 138.

[61] Molnar P, Stock J M. Slowing of India’s convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics [J]. *Tectonics*, 2009, 28(3): TC3001.

[62] Copley A, Avouac J P, Royer J Y. India – Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate: Implications for the forces driving plate motions [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115 (B3): B03410.

[63] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid – Miocene east – west extension in southern Tibet [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 220(1/2): 139 – 155.

[64] Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east – west extension [J]. *Nature*, 1995, 374(6517): 49 – 52.

Chronological evidence of Cenozoic activity in the middle and southern part of Ailao Mountain – Red River fault zone

TIAN Peng¹, YANG Zhousheng¹, YU Congjun², SUN Bin³

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Yunnan Kunming 650224, China*; 2. *Geological Environment Monitoring Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Jiangxi Nanchang 330000, China*; 3. *Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan Kunming 650031, China*)

Abstract: Many achievements have been made in studying the tectonic evolution of Ailao Mountain – Red River fault zone by using isotopic chronology, but the thermal history evolution process has not been constructed from the low – temperature to high – temperature system. And the controversy exists in the starting time of the left – lateral strike – slip of the fault zone. The age data in the south central section of Ailao Mountain – Red River fault zone were summarized, and the age values from the same isotopic system turned to be younger from the southeast to the northwest, with less differences. The study area is divided into: north, middle and south section section, and $T - t$ change curve is constructed using the low, medium and high temperature ages. The thermal history evolution shows that the fault zone has experienced two stages of cooling history. The temporal and spatial changes of cooling rate and uplift and denudation rate recorded the transmission of tensile strain from southeast to north, with gradually weakening of transformation tensile strength and fault activity during the transmission process. The activity process of the fault zone is finally divided into three stages: The immediate left walking sliding stage (35 – 20 Ma), The gradual stop stage of left – handed slipping (20 – 6 Ma), and the right – handed slipping stage (6 Ma to the present). The fault tectonic activity reflects the continuous adjustment process of the stress in the southeast margin of Qinghai – Tibet Plateau during the India – Eurasian plate collision.

Keywords: south central section of Ailao Mountain – Red River fault zone; isotopic age; tectonic and thermal evolution history

(责任编辑: 魏昊明)