

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^{*}

陈小宇 刘俊来^{**} 翁少腾

CHEN XiaoYu, LIU JunLai^{**} and WENG ShaoTeng

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2016-02-10 收稿, 2016-05-30 改回.

Chen XY, Liu JL and Weng ST. 2016. Deformation characteristics and Cenozoic exhumation of the Yao Shan complex evidenced by apatite fission track thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8):2303–2316

Abstract The Yao Shan complex is located in the southern part of the Ailao Shan-Red River (ASRR) shear zone, i. e., the China part of the Yao Shan-Day Nui Con Voi massif. In order to reveal the low-temperature thermal evolution and exhumation history of the Yao Shan complex in shallow crustal level, and to understand the exhumation history and tectonic evolution of the ASRR shear zone, this paper carried out macro- and micro-structural analysis, and apatite fission track analysis along two sections parallel and cross the long axis of the complex. Our results show that, as part of a linear dome, the complex has experienced multi-phase thermal evolution since Oligocene. The thermal history inversion of apatite indicates that the Yao Shan complex was uplifted to ca. 4.3 km below the earth's surface at ~30 Ma. Subsequently, three stages of uplifting successively occurred, i. e. a first stage (30 ~ 25 Ma) of rapid cooling with cooling rates from 8 to 8.9 °C/Myr, a second (25 ~ 12.5 Ma) stage of slow cooling with cooling rates from 1.5 to 1.9 °C/Myr, and a final stage of relatively rapid cooling with cooling rates from 3.4 to 4.1 °C/Myr. According to the distribution of apatite fission track ages (AFT), the exhumation is a heterogeneous process. However, the exhumation is across the complex homogeneous with a regional overall uplift along the extension of the complex. On the regional scale, the AFT ages along the extension of the Yao Shan-Day Nui Con Voi become younger from southeast to northwest, indicating a diachronism of exhumation. Meanwhile, the exhumation is heterogeneous, similar to an undulatory exhumation pattern along the Yao Shan complex.

Key words Apatite fission track; Deformation characteristics; Cenozoic cooling and exhumation history; Ailao Shan-Red River shear zone; Yao Shan complex

摘要 瑶山杂岩是位于哀牢山-红河剪切带(ASRR)上最南端的一个杂岩体,即瑶山-大象山杂岩的中国境内部分。为了揭示杂岩体的低温热演化与浅部剥露历史,并正确理解 ASRR 变质杂岩的剥露与构造演化,本文开展了杂岩体的宏观构造以及深入的显微构造分析,并在平行杂岩延伸方向和垂直杂岩延伸方向上进行了磷灰石裂变径迹分析。结果显示,瑶山杂岩作为一个宏观线性穹隆,自渐新世以来经历了多阶段热演化过程。磷灰石的热历史反演结果表明,在约 30 Ma 的时候,瑶山杂岩就已经剥露到距地表 4.3 km 处,继而存在三次抬升过程:30 ~ 25 Ma,是一个快速的抬升过程,冷却速率为 8 ~ 8.9 °C/Myr;25 ~ 12.5 Ma,是一个相对缓慢的抬升过程,冷却速率为 1.5 ~ 1.9 °C/Myr;从中新世约 13 Ma 至今,抬升速度又开始加快,但小于第一阶段的速度,冷却速率为 3.4 ~ 4.1 °C/Myr。根据磷灰石裂变径迹年龄的分布,在平行杂岩体的延伸方向上,剥露过程不是整体抬升的,而是一个不均匀的剥露过程;而在垂直杂岩体延伸方向上,是一个整体的均匀的剥露过程。区域尺度上,沿着瑶山-大象山杂岩体延伸方向上,从南东到北西,磷灰石年龄有逐渐变新的趋势,说明剥露具有穿时性;而在瑶山杂岩局部,剥露具有不均匀性,类似于波瓦状剥露特点。

关键词 磷灰石裂变径迹;变形特征;新生代冷却与剥露历史;哀牢山-红河剪切带;瑶山杂岩

* 本文受国家“973”项目(2015CB452601)和国家自然科学基金项目(41430211,41172190)联合资助。

第一作者简介:陈小宇,女,1989年生,博士生,构造地质学专业,E-mail:xychen@cugb.edu.cn

** 通讯作者:刘俊来,男,1960年生,教授,从事构造地质学的教学与研究, E-mail:jlilou@cugb.edu.cn

中图法分类号 P542; P597.3

1 引言

哀牢山-红河剪切带(ASRR)是东南亚地区一条重要的构造界线(图1)。作为印支地块的东部边界,它在新生代时期印度-欧亚板块碰撞以及印支地块东南向逃逸过程中起着重要的调节作用,因而长期以来成为地质学家关注的重要构造带之一(Molnar and Tapponnier, 1975; England and Molnar, 1990; Schärer *et al.*, 1990, 1994; Tapponnier *et al.*, 1990; Harrison *et al.*, 1992, 1996; Leloup *et al.*, 1993, 1995, 2001, 2007; Chung *et al.*, 1997; Gilley *et al.*, 2003; Searle, 2006; Searle *et al.*, 2010; 刘俊来等, 2006, 2008)。这一长度大于1000km、宽度约20km的剪切带发育了雪龙山、点苍山、哀牢山和瑶山-大象山(Day Noi Con Voi)等变质块体(图1a, Leloup *et al.*, 1993, 1995; Nam *et al.*, 1998; Cao *et al.*, 2011a; Liu *et al.*, 2012, 2015)。对其中的深变质岩组成、变形-变质作用及热年代学的研究揭示出在印度板块向欧亚板块的碰撞及后碰撞运动调整过程中,沿着剪切带发育的大规模左行走滑剪切作用使得断裂带南西侧的印支地块相对于剪切带北东侧的华南地块向南逃逸500km以上,并且伴随着中国南海海盆的打开(Tapponnier *et al.*, 1990; Schärer *et al.*, 1994; Leloup *et al.*, 1995, 2001; Harrison *et al.*, 1996; Chung *et al.*, 1997; Zhang and Schärer, 1999; Gilley *et al.*, 2003)。

前人对该剪切带开展了大量的工作,哀牢山-红河剪切带内深变质岩的热演化与剥露一直是广泛讨论的一个重要课题(Harrison *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1998; Leloup *et al.*, 2001, 2007; Anczkiewicz *et al.*, 2007; Viola and Anczkiewicz, 2008; Cao *et al.*, 2011b)。目前关于剥露机制的研究主要运用角闪石、黑云母、白云母和钾长石的Ar-Ar和K-Ar测年;而低温热历史的研究,例如锆石、磷灰石的裂变径迹和U-TH-He定年等方面开展的工作很少(陈文等, 2011),而且仅在点苍山、哀牢山以及大象山地区有报道(万京林等, 1997; Viola and Anczkiewicz, 2008; 李宝龙等, 2012)。

为了揭示杂岩体低温热演化与浅部剥露历史,并正确理解ASRR变质杂岩穹窿的剥露与构造演化,本文主要围绕哀牢山-红河剪切带最南端的瑶山杂岩体,即瑶山-大象山杂岩的中国境内部分,对杂岩体开展宏观构造以及剪切变形岩石的显微构造分析,同时对平行杂岩延伸方向和垂直杂岩延伸方向分别进行磷灰石裂变径迹分析;结合前人在ASRR剪切带其他杂岩体获得的裂变径迹数据,探讨区域与局部的年龄变化、杂岩体低温阶段热历史剥露及其构造意义。

2 地质背景

哀牢山-红河构造带是东南亚地区最为醒目的复杂线性构造带之一,它分隔了华南地块和印支地块,内部包括了多阶段构造叠加组合,由东向西依次发育了晚太古代-新元古代深变质岩系、新生代剪切带、金平-沱江晚二叠-早三叠世裂谷残余和哀牢山早石炭世-早三叠世混杂岩带(刘俊来等, 2011)。其中最典型的是作为印支地块与华南的扬子地块界限的哀牢山缝合带和新生代哀牢山-红河剪切带(Tapponnier *et al.*, 1990; Leloup *et al.*, 1995, 2001; Chung *et al.*, 1997; Sone and Metcalfe, 2008; Cao *et al.*, 2011a)。哀牢山缝合带主要是在晚石炭到早三叠世,由印支地块与扬子地块汇聚形成(张旗等, 1995; Jian *et al.*, 2009; Yumul *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012; Faure *et al.*, 2014);而哀牢山-红河剪切带归因于新生代时期印度与欧亚板块碰撞过程中印支地块的侧向逃逸(Tapponnier *et al.*, 1990; Leloup *et al.*, 1993, 1995, 2001)。

哀牢山-红河剪切带由四个杂岩体组成,由北到南依次为雪龙山、点苍山、哀牢山和瑶山-大象山杂岩体(Leloup *et al.*, 1995, 2001; Cao *et al.*, 2011a, b; Chen *et al.*, 2015)。作为ASRR上最南东侧的杂岩体,瑶山-大象山杂岩是一个呈NW-SE向展布、由深变质岩组成的强变形带。瑶山-大象山杂岩在越南境内延长约270km,在中国境内长约为80km,杂岩体向南东延伸而进入南中国海,向北西在河口蛮耗北部消失,覆没于二叠系-三叠系浅变质岩系之下(图2)。杂岩体宽度可达约20km且由南向北变化不大。

中国境内的瑶山杂岩由元古界瑶山群深变质岩组成,北侧上覆有二叠系和三叠系浅变质沉积岩系。瑶山群是一套经历过强烈剪切变形和高级变质作用(局部有混合岩化作用)改造的岩石组合,主要由黑云母片岩、黑云母斜长片麻岩、石榴黑云母片麻岩、夕线石榴黑云母片麻岩、大理岩和斜长角闪岩等为主组成的一套峰期变质达高角闪岩相-麻粒岩相的中深变质岩系。瑶山群北东侧发育小规模花岗岩体,局部地区零星发育岩脉,并与围岩一同遭受强烈剪切变形作用改造,使得岩脉延伸方向与拉伸线理方向一致。二叠系和三叠系岩石普遍遭受中低级变质作用(达高绿片岩相),主要有大理岩、片岩、千枚岩、变质粉砂岩、变质玄武岩等组成。杂岩体北东侧以斋江(Song Chay)断裂为界与弱变形、低级变质或未变质的新元古-古生界地层接触,南西侧则以红河断裂为界与哀牢山-范士坂变质杂岩相接(图2)。

3 瑶山杂岩构造特征

3.1 宏观构造特征

无论从地质图以及野外构造要素观察,岩层总体产状轮

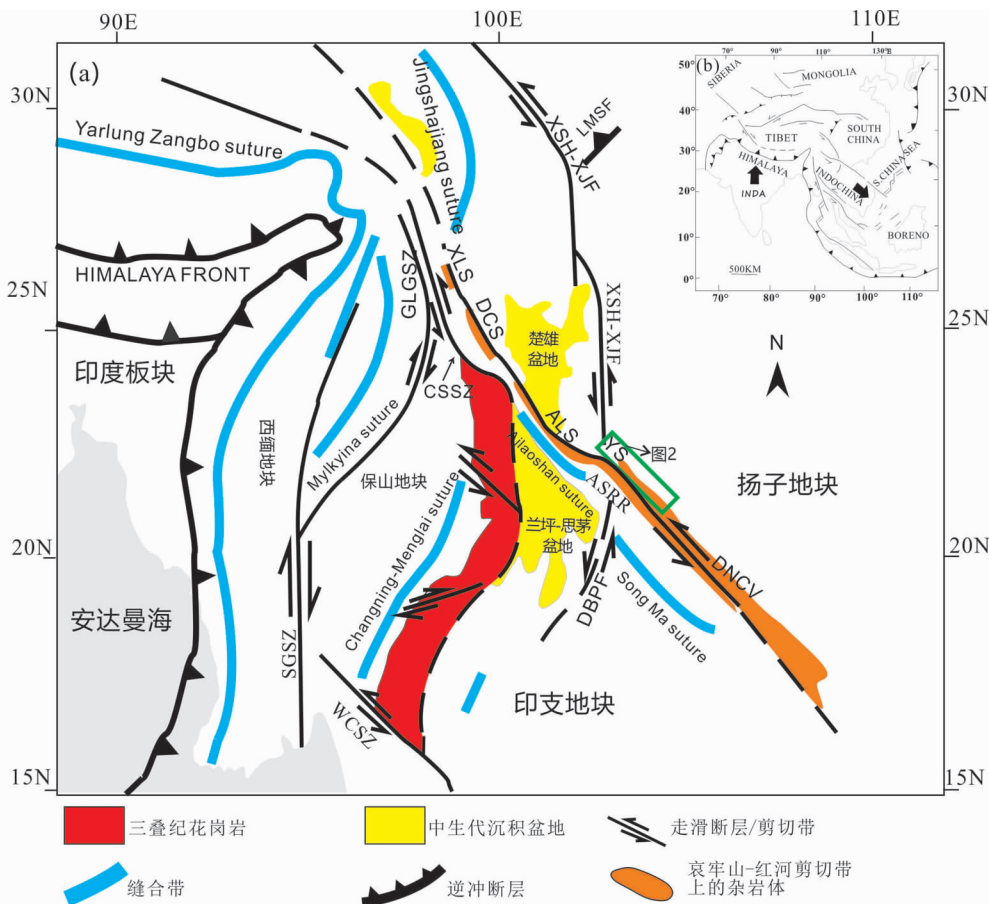


图1 东南亚地区构造格架图(据 Leloup *et al.*, 1995 修改)

(a) 东南亚地区主要构造带;(b) 印度-欧亚碰撞带构造格架. XLS: 雪龙山变质杂岩体; DCS: 点苍山变质杂岩体; ALS: 哀牢山变质杂岩体; YS: 瑶山变质杂岩体; DNCV: 大象山变质杂岩体; ASRR: 哀牢山-红河剪切带; GLG: 高黎贡剪切带; CSSZ: 崇山剪切带; WCSZ: 王朝剪切带; DBPF: 奠边府断裂; XSH-XJF: 鲜水河-小江断裂; LMSF: 龙门山断裂; SGSZ: 实皆断裂带

Fig. 1 Tectonic map of Southeast Asia (after Leloup *et al.*, 1995)

(a) major tectonic belts in Southeast Asia; (b) tectonic map of the Indian and Eurasian collision zone. XLS: Xuelong Shan complex; DCS: Diancang Shan complex; ALS: Ailao Shan complex; YS: Yao Shan complex; DNCV: Day Nui Con Voi complex; ASRR: Ailao Shan-Red River shear zone; GLG: Gaoligong shear zone; CSSZ: Chongshan shear zone; WCSZ: Wangchao shear zone; DBPF: Dien Bien Phu fault; XSH-XJ: Xianshuihe-Xiaojiang fault; LMSF: Longmen Shan fault. SGSZ: Sagaing fault

廓构成一个宏观倾伏背斜,瑶山杂岩最北端构成倾没端,背斜核部由元古界瑶山群深变质岩构成,其外围环绕着二叠系和三叠系浅变质岩石。背形构造南西侧和北东侧分别被倾向南西的红河断裂以及倾向北东的斋江断裂错断,使得宏观褶皱的两翼与相邻地块呈断层接触(Chen *et al.*, 2016)(图2)。值得注意的是,无论二叠系-三叠系浅变质岩系还是瑶山杂岩深变质岩系构成的宏观背形构造格架,仅限于在瑶山杂岩的北段发育;在其中南段主要出露背形构造的SW翼,表现为一个区域性单斜构造特点(Chen *et al.*, 2016)。此外,根据杂岩体叶理产状的变化,越南境内的大象山同样显示出线性背形构造(Jolivet *et al.*, 2001; Anczkiewicz *et al.*, 2007)。

在露头尺度上,糜棱叶理、A-型褶皱、拉伸线理、剪切岩脉和构造透镜体等是最为常见的构造。深变质杂岩内各类

岩石面理较发育,包括早期变质岩的片理和片麻理、剪切作用形成的糜棱叶理等(图3a),很多情况下二者接近平行,显示出强烈剪切变形的结果。剪切变形的深变质岩内部经常发育矿物拉伸线理(如石英、云母、夕线石等),总体上线理倾向向主要是北西-南东向,倾向角较小,常常近水平(图3a)。瑶山杂岩A型褶皱大量发育,褶皱枢纽与拉伸线理的方向一致(图3b)。从褶皱几何学特点可以看出,在平行于褶皱枢纽的方向,也即在平行于拉伸线理方向的剖面上,可以见到平直的褶皱枢纽会有很大的延长性,充分显示出沿着拉伸线理方向高或极高应变的存在。在片岩或片麻岩中局部有浅色花岗质岩脉或长英质岩脉的发育,岩脉被剪切改造成透镜体状或残斑状(图3c)。部分岩脉在剪切早期过程中发生褶皱作用,并且褶皱的轴面叶理与围岩的叶理一致,指示早期的褶皱事件(图3d),而在局部可以观察到剪切叶理发生弯

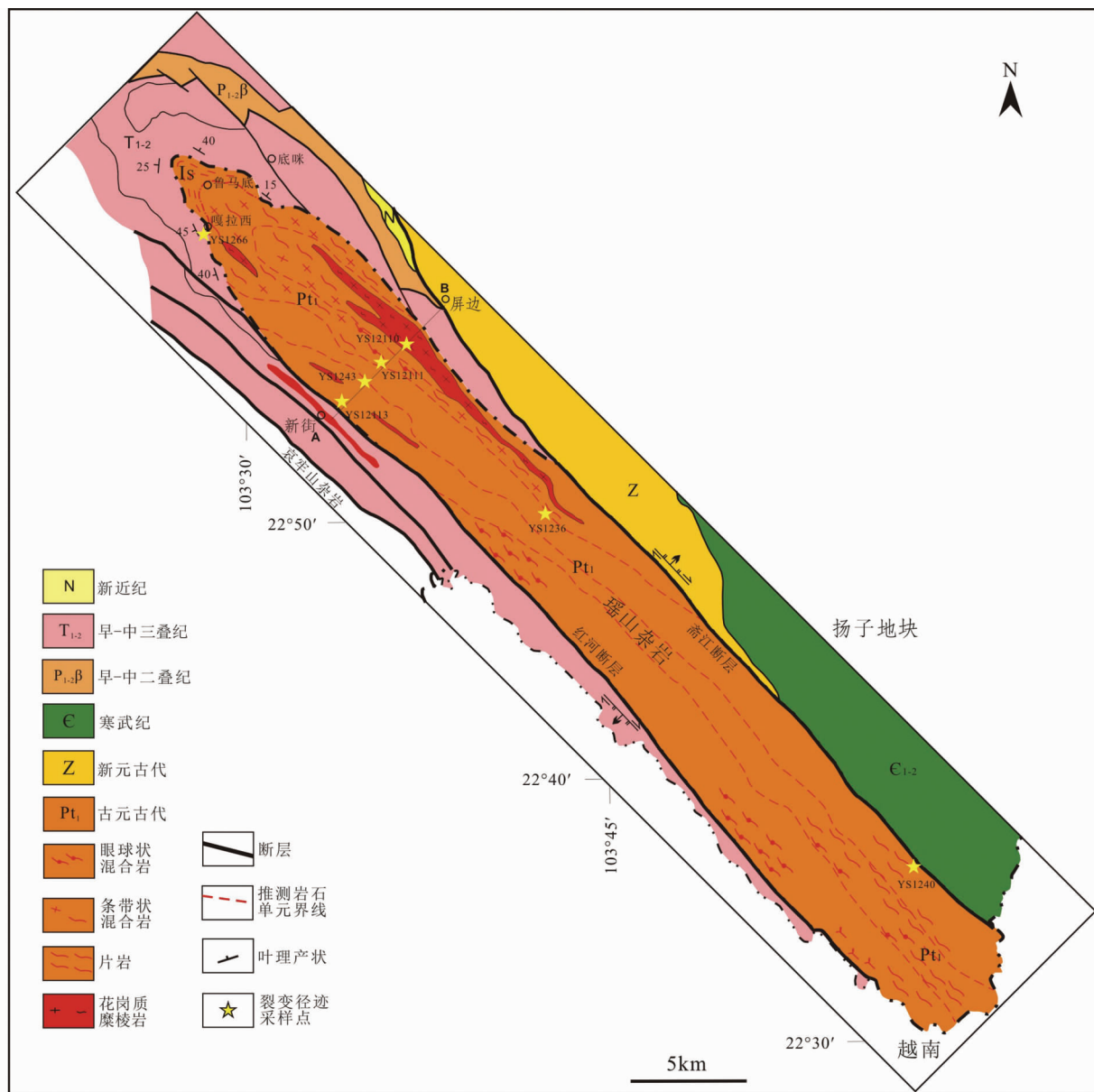


图2 瑶山杂岩地质简图

Fig. 2 Geological map of the Yao Shan complex

曲的情况, 显示出剪切作用晚期的褶皱作用(图 3e)。在瑶山群夕线石榴片麻岩中, 石榴子石、长石通常呈残斑, 叶理围绕其分布, 表明剪切前或者同剪切的矿物生长(图 3f, g)。野外观察中, 变质变形并不局限在元古代瑶山群岩石中, 三叠纪个旧组和永宁镇组大理岩都被剪切改造成致密的薄板状, 在剪切变形作用过程中岩层变薄, 层厚小于剪切初始厚度, 同时伴随着成分分异现象, 黑色条带和白色或浅灰色条带相间排列, 厚度不一, 局部可以看到白色条带被剪切改造成透镜体状、钩状或紧闭褶皱(图 3h)。

3.2 显微构造特征

瑶山杂岩保留了强烈递进变形演化的变形显微构造特

点, 其总体表现为强烈的复杂性和显著的规律性。复杂性主要表现为: (1) 不同原岩类型具有不同的显微构造表现; (2) 经历不同演化阶段变形改造的岩石具有差异的显微构造特点; (3) 经常情况下岩石经历了复杂的多阶段递进变形改造而具有多种显微构造组合。而规律性主要表现为两个方面: (1) 具有多阶段变形改造的岩石往往保留了早期的中高温纯剪变形显微构造特点和晚期阶段的中低温单剪变形显微构造组合; (2) 从瑶山杂岩的中心部位向着两翼, 由高温变形显微构造向低温变形显微构造组合的转变(Chen *et al.*, 2016)。

瑶山群以遭受中高级变质作用改造的富铝片麻岩系(夕线石榴片麻岩)为主组成, 变质矿物组合包括: 石榴子石、夕

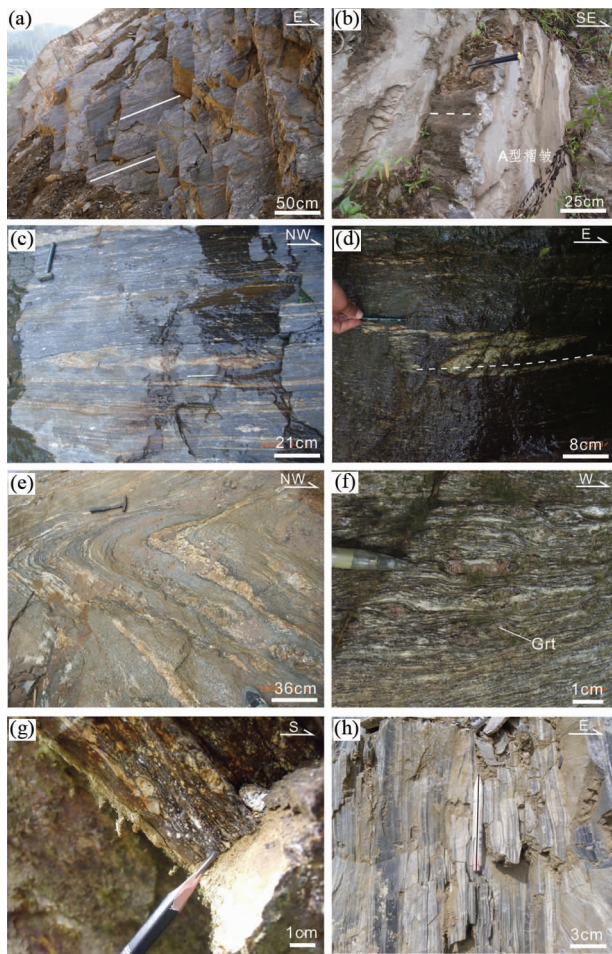


图3 瑶山杂岩宏观构造特征

(a) 黑云母片岩中近水平的拉伸线理; (b) A型褶皱, 褶皱的枢纽与拉伸线理方向一致; (c) 花岗质岩脉被剪切成交透镜体状分布于黑云母片岩中; (d) 花岗质岩脉被剪切成交折形态, 褶皱轴面与叶理一致; (e) 叶理面弯曲构成褶皱形态; (f) 石榴石呈眼球状残斑分布于夕线石榴黑云斜长片麻岩中; (g) 发育于夕线石榴黑云斜长片麻岩中的斜长石残斑; (h) 剪切变形的三叠纪大理岩

Fig. 3 Mesoscopic deformation structures of the Yao Shan complex

(a) subhorizontal lineation in a biotite schist; (b) A-type folds with fold hinges parallel to the stretching lineation; (c) granitic dykes were sheared into lenses; (d) granitic dykes were sheared into folds with fold axis parallel to foliation; (e) foliation is folded; (f) garnet porphyroclasts in a sillimanite-garnet-biotite-plagioclase gneiss; (g) plagioclase porphyroclast in a sillimanite-garnet-biotite-plagioclase gneiss; (h) sheared Triassic marble

线石、蓝晶石、黑云母、白云母、斜长石、钾长石等。几乎所有矿物都有不同程度的变形表现, 显示出在不同温度下变形作用的结果。在瑶山群部分片麻岩和片岩中, 石榴子石呈残斑形式存在, 通常呈透镜体或浑圆状并包裹有黑云母、石英、夕线石和长石矿物包裹体, 形成筛状变晶结构, 局部残斑内叶理(Si)与基质叶理(Se)相连接, 反应石榴子石为同构造生长的变斑晶(图4a), 部分石榴子石发育显微破裂, 裂隙中充填

黑云母, 反映一次退变质事件(图4b)。夕线石通常与黑云母共生, 有的呈毛发状集合体, 有的呈针柱状并且沿着剪切方向定向排列, 并可见垂直于针柱方向的裂开(图4c)。花岗质岩石具有典型的SC组构, 具有剪切指向意义的白云母鱼骨构成S面理, 细粒化的云母和石英形成C面理(图4d)。长石主要以残斑形式存在, 呈透镜体状, 扁豆状, 有的发育高温蠕英结构(图4e), 有些长石在低温环境下破裂形成多米诺构造(图4f)。石英主要呈条带状或丝带状, 并表现为颗粒边界迁移重结晶(图4g), 亚颗粒旋转重结晶, 部分样品静态恢复形成三联点形态, 局部能观察到石英动态重结晶形成的斜向叶理以及后期叠加的波状消光(图4h)。通过以上矿物变形表现, 变形温度应该达到500~600℃, 并叠加一次后期低温变形(300℃左右), 也充分显示出岩石遭受了递进剥露作用过程。

4 样品采集与实验方法

在横穿瑶山杂岩的新街-屏边剖面以及平行于杂岩体的延伸方向(即北西-南东向)上进行系统采样(图2), 以便对比研究, 采集样品为古元古代瑶山群岩石。

单矿物分选在河北省廊坊区调队实验室完成, 样品经传统方法粗选后, 利用电磁选、重液选等手段分离出所需的磷灰石单矿物颗粒。磷灰石裂变径迹测试是在中国地质大学(北京)裂变径迹实验室进行, 将磷灰石颗粒用环氧树脂滴固, 然后进行研磨和抛光, 制作成光薄片, 使得矿物内表面露出。并在21℃下用5.5 molar HNO₃溶液蚀刻20s揭示自发径迹, 将低轴白云母外探测器与矿物一并放入反应堆照射, 之后在25℃下用40% HF蚀刻20min揭示诱发径迹, 中子剂量利用CN5铀玻璃标定(Bellemans *et al.*, 1995)。利用AUTOSCAN仪器选择平行c轴的柱面测出自发径迹和诱发径迹密度以及水平径迹密度; 应用IUGS推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程计算年龄值。

5 实验结果

磷灰石样品的裂变径迹测试结果见表1和图5, 其表观年龄在18~27Ma之间。 $P(\chi^2)$ 值用于评价所测单颗粒属于同一年龄组的概率(Gallbraith, 1981), 当 $P(\chi^2) > 5\%$ 时属于同组年龄, 代表受到同一热事件影响; 而当 $P(\chi^2) < 5\%$ 时表明年龄分布不均匀, 说明是混合年龄(袁万明等, 2001, 2007; Yuan *et al.*, 2006)。

样品YS1266、YS1240、YS12113、YS12111和YS12110的磷灰石裂变径迹年龄分别为 27 ± 2 Ma, 23 ± 3 Ma, 21 ± 2 Ma, 22 ± 2 Ma和 18 ± 1 Ma, 远小于地层年龄; $P(\chi^2)$ 值分别为19.3、95.1、95.4、18.7和37.3, 远大于5%, 所以, 每个样品单颗粒年龄均属于同组年龄, 是受同一热事件影响的结果。单颗粒年龄直方图呈现较为典型的单峰式分布(图5), 符合受单一

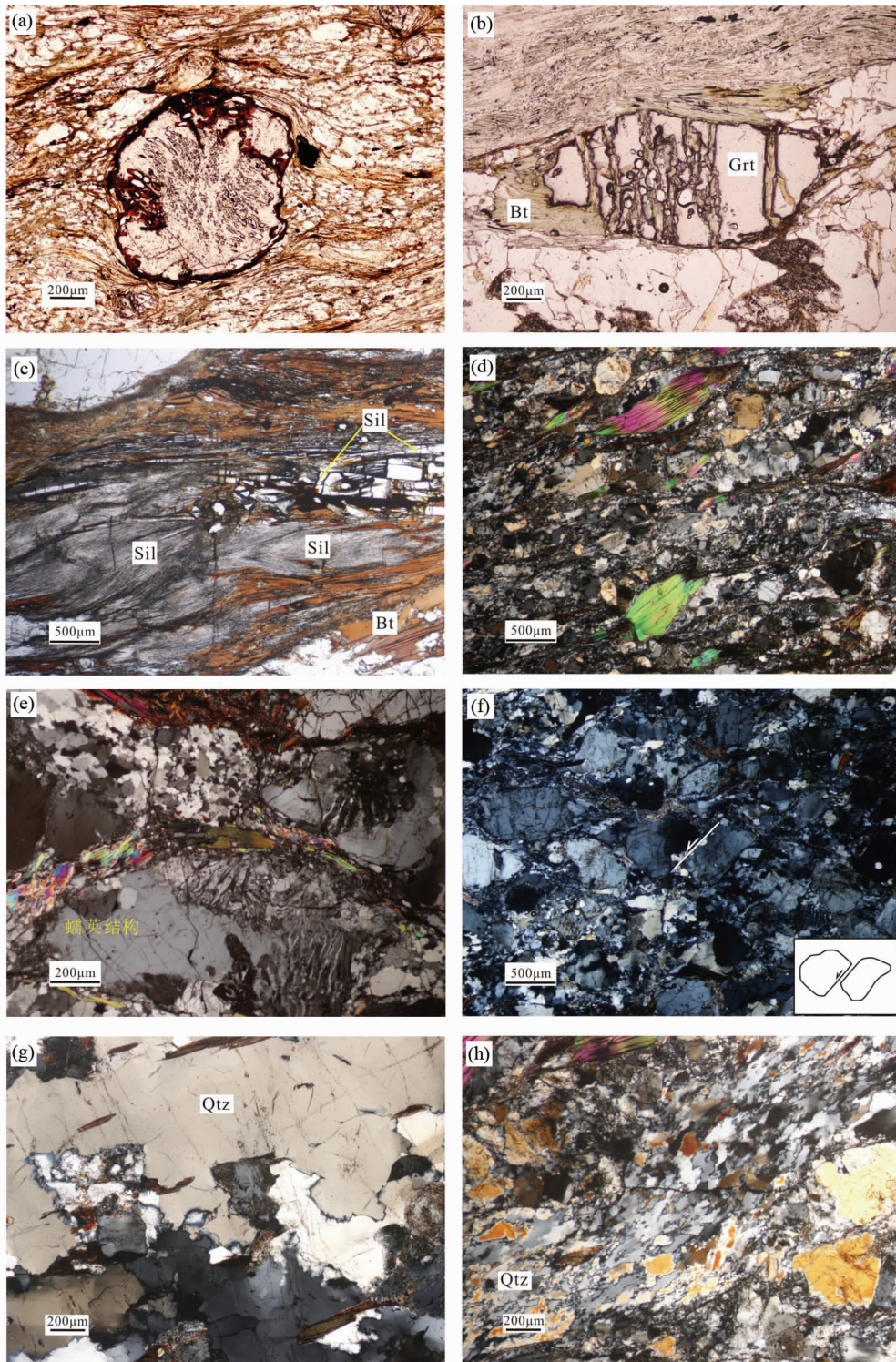


图4 瑶山杂岩构造岩变形显微构造特征

(a) 同构造生长的石榴石变斑晶; (b) 石榴石变斑晶受到剪切变形, 裂隙和应变影中充填黑云母; (c) 夕线石榴片麻岩中的两种夕线石定向排列; (d) 剪切变形花岗岩, 具有典型的SC组构; (e) 剪切变形花岗岩中的蠕英结构; (f) 斜长石发育多米诺构造; (g) 石英颗粒边界迁移重结晶; (h) 石英斜向叶理以及叠加后期的波状消光

Fig. 4 Microstructures of tectonites from the Yao Shan complex

(a) syntectonic garnet porphyroblast; (b) sheared garnet porphyroblast with biotite grains along fractures and in the strain shadow; (c) orientation of two types of sillimanite in sillimanite-garnet gneiss; (d) sheared granite with typical SC fabric; (e) myrmekites in a sheared granite; (f) domino structure developed in a feldspar; (g) grain boundary migration of quartz; (h) quartz oblique foliation and superposition of later undulate extinction

表 1 磷灰石裂变径迹分析结果

Table 1 The analysis results of apatite fission track

样品号	颗粒数 (Ns)	ρ_s ($10^5/\text{cm}^2$) (n)	ρ_i ($10^5/\text{cm}^2$) (Ni)	ρ_d ($10^5/\text{cm}^2$) (Nd)	$P(\chi^2)$ (%)	中心年龄 ($\pm 1\sigma$) (Ma)	L (μm) (N)
YS1266	28	4.234 (1415)	37.595 (12565)	12.518 (7380)	19.3	27 \pm 2	13.4 \pm 1.9 (101)
YS1236	28	3.43 (1396)	30.681 (12486)	11.037 (7380)	0	23 \pm 2	12.9 \pm 1.7 (124)
YS1240	31	0.896 (118)	7.888 (1184)	11.826 (7380)	95.1	23 \pm 3	12.4 \pm 2.1 (41)
YS1239	28	2.103 (985)	19.761 (9256)	11.629 (7380)	0	22 \pm 2	12.7 \pm 1.8 (105)
YS12113	28	1.382 (286)	17.243 (3568)	13.602 (7380)	95.4	21 \pm 2	12.0 \pm 2.4 (103)
YS1243	28	2.318 (982)	24.653 (10445)	12.221 (7380)	0.7	22 \pm 1	12.3 \pm 2 (104)
YS12111	29	1.562 (303)	18.691 (3625)	13.208 (7380)	18.7	22 \pm 2	12.7 \pm 2.4 (61)
YS12110	32	1.228 (350)	17.396 (4959)	13.011 (7380)	37.3	18 \pm 1	12.6 \pm 1.9 (98)

注: ρ_s 、 ρ_i 和 ρ_d 分别表示自发径迹密度, 诱发径迹密度和标准径迹密度; Ns、Ni 和 Nd 分别表示自发径迹数, 诱发径迹数和标准径迹数; L-径迹长度; N-径迹数; $P(\chi^2)$ 为 χ^2 的检验值

热事件控制的特点。这几个样品的平均径迹长度在 12.0 \pm 2.4 ~ 13.4 \pm 1.9 μm 之间, 平均径迹长度变化不大, 但是长度值相对较小, 长度标准差较大, 表明其在磷灰石退火带滞留时间较长。5 个样品的径迹长度直方图均呈单峰型 (图 6), 同样记录最近一次热事件的影响。

样品 YS1236、YS1239 和 YS1243 的表观年龄分别为 23 \pm 2Ma, 22 \pm 2Ma 和 22 \pm 1Ma, 其 $P(\chi^2)$ 值分别为 0、0 和 0.7, 说明是混合年龄, 曾经历不止一次热事件影响。使用 Binomfit 软件对其进行处理分析, 则样品 YS1236 分解为两个混合年龄 23.8Ma 和 28.3Ma, 样品 YS1239 获得的两个混合年龄为 15.6Ma 和 23.9Ma, 样品 YS1243 经分解获得的两个混合年龄为 12.8Ma 和 22.2Ma (图 7)。

6 讨论

6.1 磷灰石热历史模拟

磷灰石裂变径迹退火行为与温度有密切关系, 磷灰石裂变径迹退火带一般为 60 ~ 120 $^{\circ}\text{C}$ (Fitzgerad *et al.*, 1995)。在退火带内, 径迹既可以新生又可以消失 (袁万明等, 2007), 当温度高于退火温度时, 已有的径迹将全部消失, 而且没有新的径迹形成; 当温度低于退火带时, 新径迹不断形成并得以保留。磷灰石裂变径迹年龄和径迹长度研究可以获得重要的温度-时间信息, 故利用裂变径迹长度分布和裂变径迹年龄, 可以获得研究对象的热历史 (Green *et al.*, 1989)。本文利用 Ketcham *et al.* (1999) 提出的退火模拟, 应用 Monte Carlo 逼近法模拟, 并借助于 HeFTy 软件对所有磷灰石样品

进行热历史反演模拟。模拟起始温度为 130 $^{\circ}\text{C}$, 略高于磷灰石裂变径迹封闭温度, 模拟起始时间根据样品单颗粒年龄而定。热史模拟图一般可分为三个区: 可接受拟合区间, 较好拟合区间以及最佳的热历史路径。K-S 值和 GOF 值是检验模拟结果理想与否的参数, 当 K-S 值和 GOF 值均大于 0.5 时, 一般认为模拟结果是理想的 (袁万明等, 2007)。本文对 4 件样品进行了热史反演模拟, 每件样品均进行多次模拟, 最终选择最好的模拟结果。如图 8 所示, 图中绿色部分代表可以接受的拟合区间, 中心红色部分代表好的拟合区间, 实线代表最佳的热历史路径。

样品 YS1266 的模拟结果如图 8a 所示, 总体上经历三个阶段的冷却历史, 从 30Ma 到 25Ma, 为一次快速的剥露过程, 5Myr 的时间内降幅温度为 40 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率为 8 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$; 从 25Ma 到 13Ma, 这个阶段经历了一次缓慢的剥露过程, 降幅温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率为 1.7 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$; 自 13Ma 至今, 较为快速剥露, 此阶段降温约 50 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率为 3.8 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 。

样品 YS1236 的模拟结果也很理想, 如图 8b 所示, 同样也表现出三阶段的冷却历史: 首先在 30 ~ 24.8Ma 期间, 经历一次快速的剥露过程, 降幅温度为 45 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率为 8.7 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$; 继而从 24.8Ma 到 12.5Ma 期间, 经历一次缓慢的抬升剥露过程, 冷却速率大概在 1.9 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 左右, 降幅温度约为 23 $^{\circ}\text{C}$; 自 12.5Ma 至今, 降幅温度为 42 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率为 3.4 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 。

样品 YS1240 的模拟结果也表明了三个阶段抬升剥露事件 (图 8c), 29.5 ~ 25Ma, 温度由 130 $^{\circ}\text{C}$ 冷却到 90 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率为 8.9 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$; 之后, 25Ma 到 13Ma 期间, 经历一次缓慢的抬

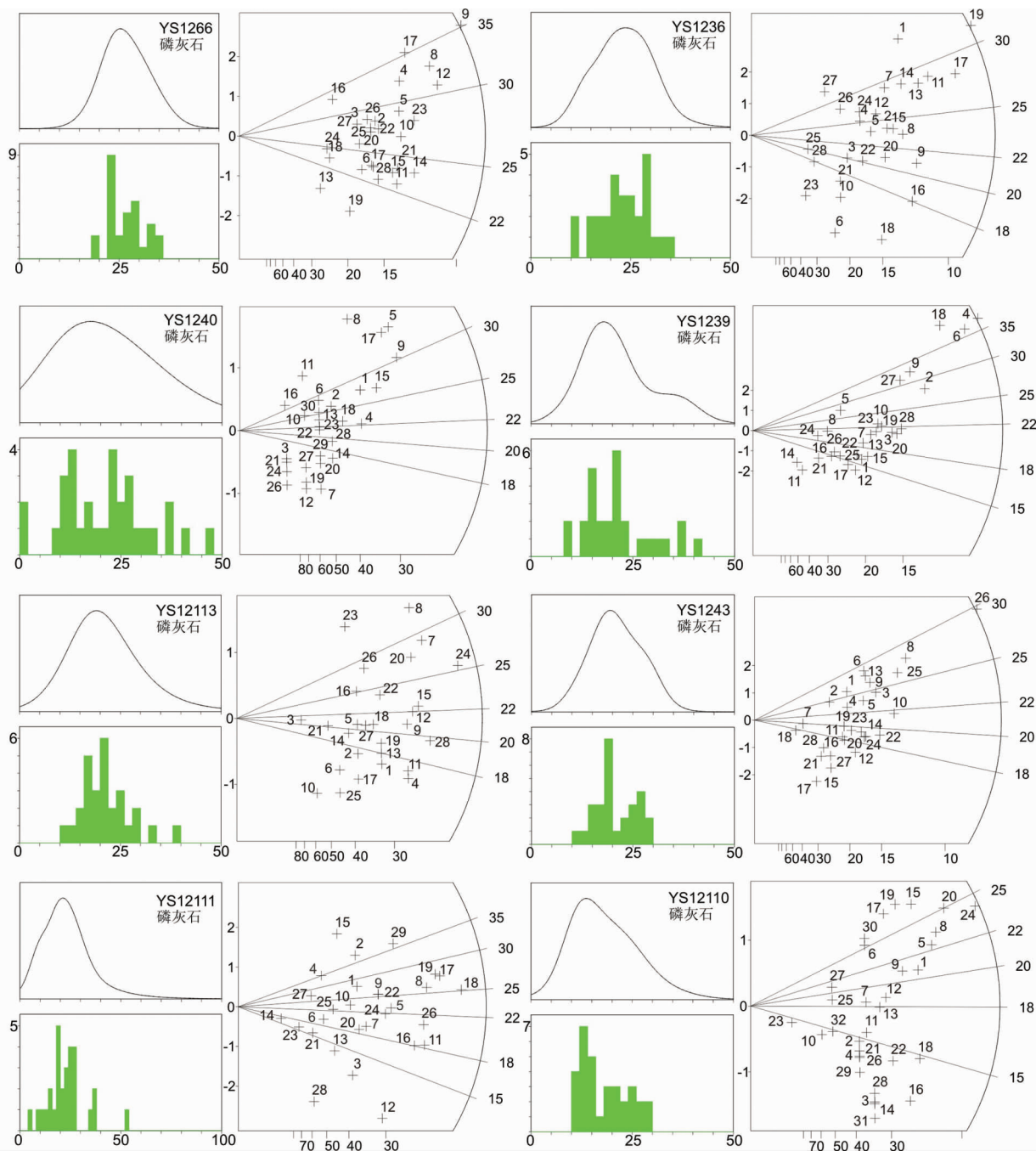


图5 单颗粒年龄分布直方图(左下)和频率曲线(左上)及单颗粒年龄雷达图(右)

Fig. 5 Histogram, frequency curve and radial plots of the single grain ages

升剥露过程,冷却速率大概在 $1.7^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 左右,降幅温度约为 20°C ;自 13Ma 至今,降幅温度为 50°C ,冷却速率为 $3.8^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 。

样品 YS1243 的模拟结果也很理想,模拟结果表明,在 $30\sim 25\text{Ma}$ 左右存在着快速的抬升剥露过程,温度由 130°C 冷却到 90°C ,冷却速率为 $8^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$;从 25Ma 到 12Ma ,经历了一次缓慢的剥露过程,该阶段降幅温度为 20°C ,冷却速率为 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$;自 12Ma 至今,较为快速剥露,此阶段降温约

50°C ,冷却速率为 $4.1^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ (图 8d)。

根据以上的磷灰石热历史反演结果,在约 30Ma 的时候,瑶山杂岩就已经剥露到距地表约 4.3km 处。继而存在三次抬升剥露过程,首先,从渐新世约 $30\sim 25\text{Ma}$,是一个快速的抬升过程,该阶段的冷却速率为 $8\sim 8.9^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$,取地温梯度为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Clift *et al.*, 2006),则该阶段的升降速率为 $0.27\sim 0.30\text{km}/\text{Myr}$;然后,从 25Ma 到约 12.5Ma ,是一个相对缓慢的抬升过程,这个阶段的冷却速率在 $1.5\sim 1.9^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 之间,

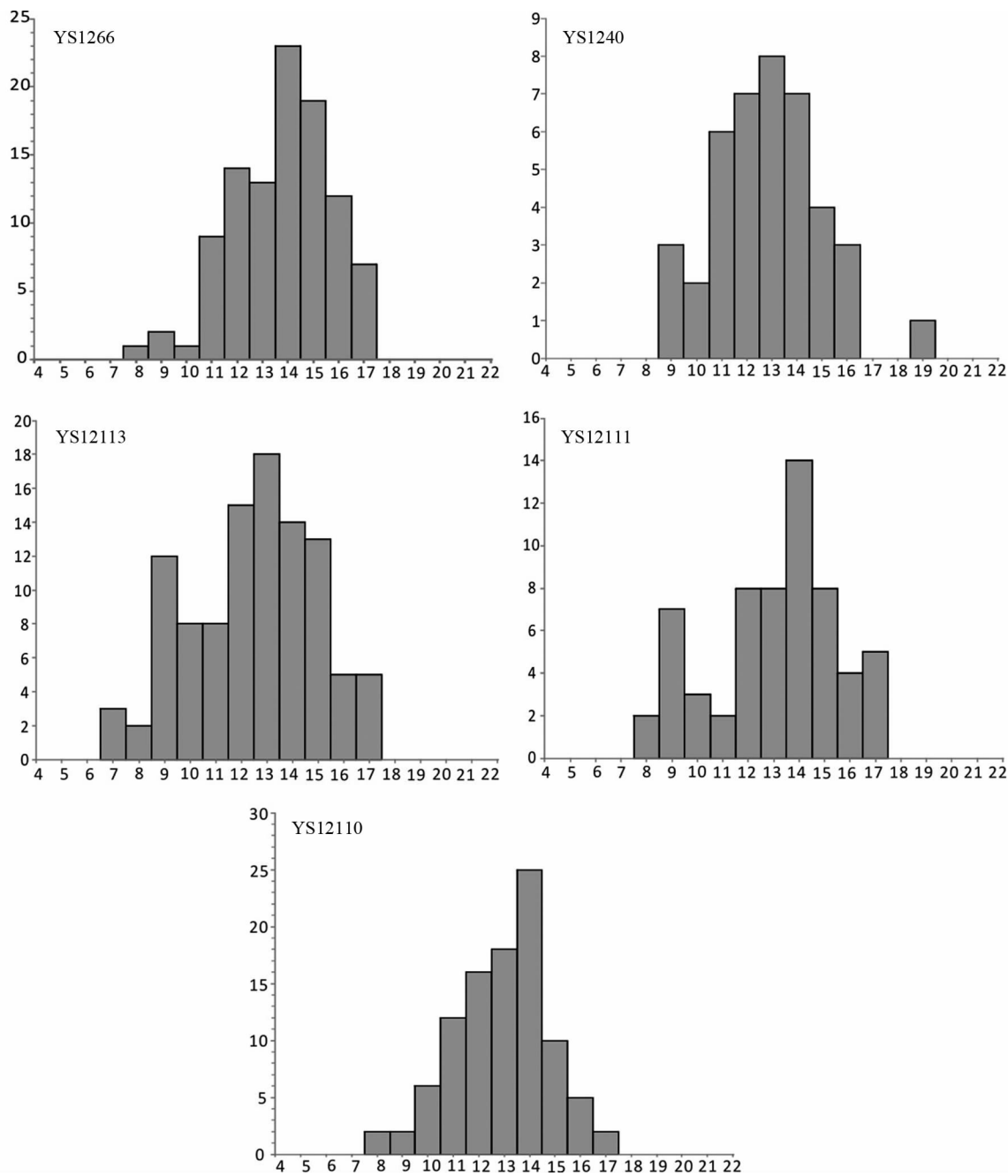


图6 磷灰石裂变径迹长度分布直方图

Fig. 6 Histograms of apatite fission track lengths

隆升速率为 0.05 ~ 0.06km/Myr, 隆升缓慢; 最后, 从中新世约 13Ma 至今, 抬升速度又开始加快, 但小于第一阶段的速度, 该阶段冷却速率为 3.4 ~ 4.1℃/Myr, 隆升速率为 0.11 ~ 0.14km/Myr。

6.2 瑶山杂岩的剥露特征

本次研究中主要沿着横穿杂岩体的新街-屏边剖面以及平行杂岩体的延伸方向进行采样分析, 我们根据采样位置及对应的年龄, 做出采样地形剖面及年龄分布图(图9)。从新

街-屏边图可以看出(图9a), 磷灰石年龄变化不大, 从西到东依次为 21Ma、22.2Ma、22Ma 和 18Ma, 裂变径迹年龄在误差范围内趋于一致, 而且与地形的起伏没有呈现一定的相关性, 说明在垂直杂岩体的延伸方向上, 瑶山杂岩自中新世以来经历一次整体而较为均匀的剥露过程。

在平行杂岩体的延伸方向上(图9b), 磷灰石年龄有一定的波动, 从北西到南东方向上, 磷灰石裂变径迹年龄依次为 27Ma、22Ma、28.3Ma、23Ma, 这些数据表明自渐新世以来在平行杂岩体的延伸方向上, 剥露过程不是整体抬升的, 而

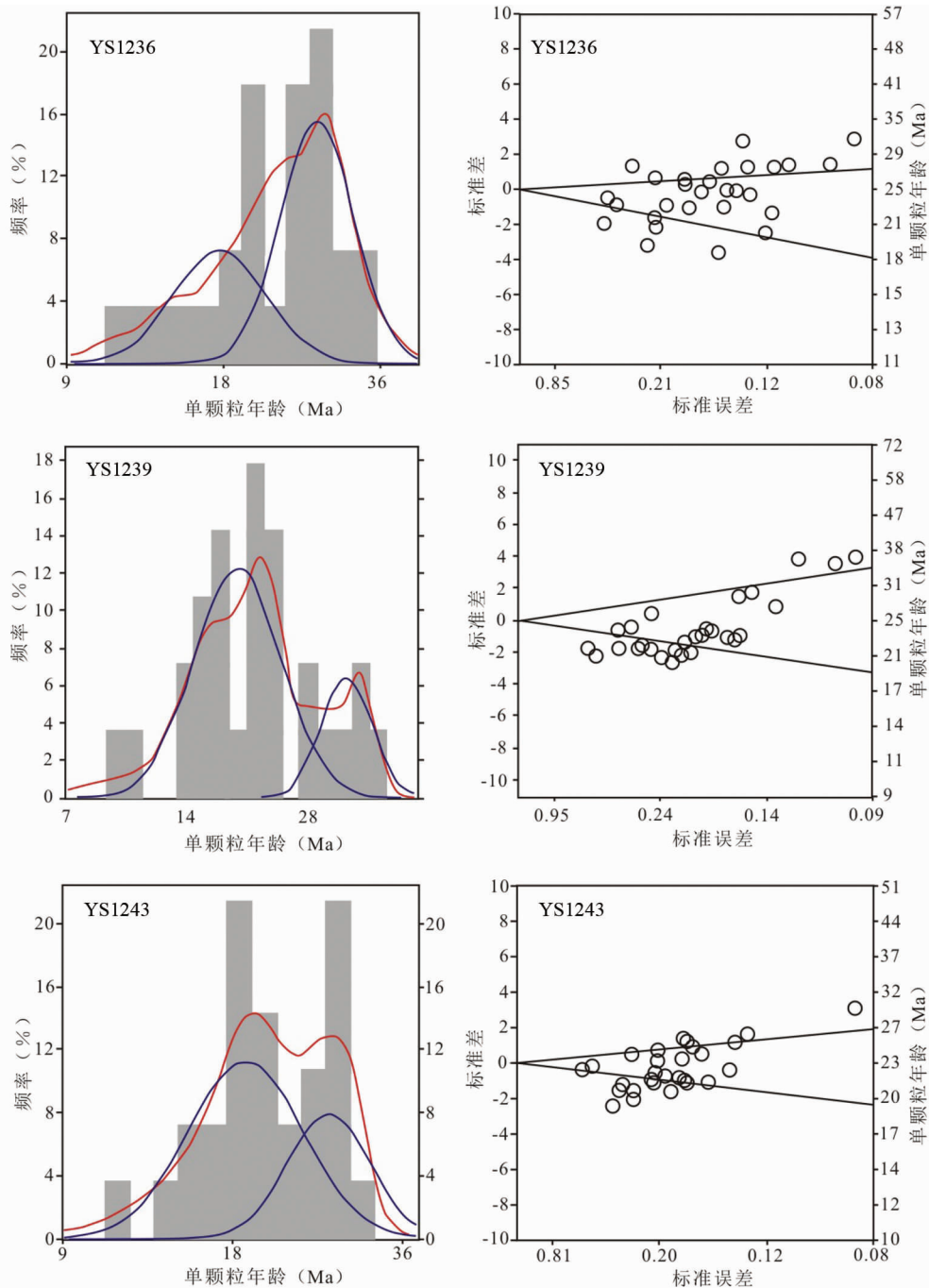


图7 应用 Binomfit 软件对混合年龄分解

单颗粒年龄分布直方图(左)及雷达图(右)

Fig.7 The age resolution in samples with mixed distribution of ages using the Binomfit software

The histogram (left) and radial plot (right) of single grain ages

是一个不均匀的剥露过程。

6.3 区域构造意义

瑶山杂岩位于印支地块的东南缘,其北东侧以斋江断裂为界,与扬子地块相邻,经历多时期、多阶段演化,其中最具有深刻影响的是晚新生代以来印度与欧亚板块后碰撞过程

中印支地块逃逸对该地区的影响。在本文磷灰石裂变径迹分析结果中,5个同组年龄范围在18~27Ma之间,具有确切的地质含义。另外3个样品属于混合年龄,包含了23.8Ma、28.3Ma、15.6Ma、23.9Ma、12.8Ma和22.2Ma六组年龄,其中23.8Ma、28.3Ma、23.9Ma和22.2Ma于同组年龄范围相符,反映自渐新世以来,印支地块逃逸过程中哀牢山-红河剪切

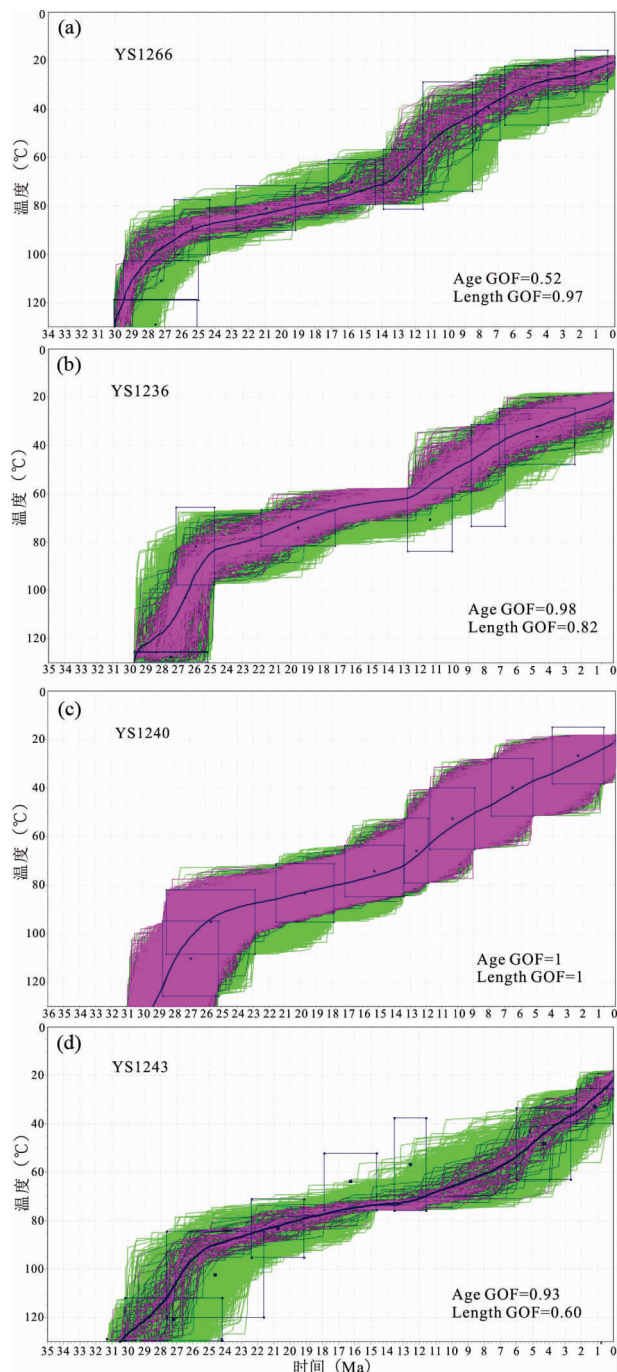


图8 磷灰石样品热历史模拟结果

Fig. 8 Thermal history simulation results of apatite samples

带的剪切作用以及剪切后热均衡事件对该地区的影响。而 12.8 Ma 和 15.3 Ma 则反映后期变形叠加事件,可能归因于红河断裂的右行活动。

本次研究通过磷灰石热史模拟,获得从 130°C 到地表温度这个阶段的冷却历史,总体上经历了三个阶段的冷却历史,总体上,瑶山杂岩体的快速剥露过程与剪切作用过程中伴随的地壳尺度褶皱作用有关(Chen *et al.*, 2016),热史模

拟的第一阶段(30~25Ma)的快速隆升过程应归因于这种地壳尺度的剪切作用与褶皱作用。变形岩石中保留了大量高温变质矿物组合与中高温变形显微构造现象。低温热史模拟没能显示这个快速过程的起始时间,但从 30~25Ma 的快速冷却也能揭示出剪切变形-褶皱作用的晚期过程,它们伴随着瑶山杂岩从深部(中高温)向浅部(中低温)的剥露。变形岩石中保留的大量低温(约 300°C 或更低)变形显微构造现象,也显示岩石经历了低温阶段的递进剪切变形过程。当然,对于剪切作用和褶皱作用的起始时间需要进一步约束。第二阶段相对缓慢的冷却过程(25~12.5Ma)可能与剪切作用后期剪切速率在垂向上的分量降低或者与热均衡和风化剥蚀有关。第三阶段(12.5~0Ma)较为快速的冷却过程可能与红河断裂右旋走滑运动有关,张秉良等(2009)通过对红河断裂带中断层岩的磷灰石裂变径迹测年,认为红河断裂带左旋走滑运动转换为右旋走滑的时间大致开始于 12.7Ma,与我们的结果一致,此外,韩淑琴等(2007)通过对红河断裂尾端凤仪-定西岭断层中的伊利石 K-Ar 测年,获得 12.4Ma 的年龄,与我们获得的 12.5Ma 相近。

哀牢山-红河剪切带各个杂岩体的隆升剥露问题是近年来的研究热点,大量研究工作致力于新生代以来尤其是晚新生代以来剪切作用对杂岩体的隆升和剥露(Harrison *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1998; Leloup *et al.*, 2001, 2007; Anczkiewicz *et al.*, 2007; Viola and Anczkiewicz, 2008; Cao *et al.*, 2011b)。不过,对于剥露机制,剥露时限,不同地块剥露的不均匀性仍然存在较多的争议。李宝龙等(2012)通过点苍山和哀牢山的⁴⁰Ar/³⁹Ar 和磷灰石裂变径迹研究,揭示在 3~5Ma 之间点苍山经历了快速冷却事件,认为点苍山-哀牢山的隆升为掀斜式,即东部隆升幅度大,西部隆升幅度小。万京林等(1997)对采自红河断裂带片麻岩和糜棱岩样品磷灰石进行裂变径迹分析,得到 5.61~10.64Ma 年龄范围,认为磷灰石裂变径迹年龄从东南向西北有逐渐变新的趋势。Viola and Anczkiewicz (2008)对采自哀牢山和越南大象山杂岩的锆石和磷灰石裂变径迹研究同样表明,在沿着杂岩体方向上,剥露具有穿时性,且南部剥露早,并且把这种机制归因于扭张环境。本文获得的磷灰石裂变径迹年龄反映出在垂直杂岩体走向方向上具有整体均匀抬升过程,而在平行杂岩体的延伸方向上具有不均匀剥露特征。Viola and Anczkiewicz (2008)报道位于越南境内大象山杂岩北端的磷灰石裂变径迹年龄集中在 39~37Ma 左右,明显老于本文获得的瑶山杂岩的裂变径迹年龄,反映出在区域尺度上,在沿着杂岩体延伸方向上,从南东到北西,磷灰石年龄有逐渐变新的趋势,说明剥露具有穿时性,大象山杂岩剥露早,而瑶山杂岩相对较晚一些;而在瑶山杂岩局部,剥露具有不均匀性,类似于波瓦状剥露特点。

7 结论

(1)磷灰石的热历史反演结果表明,在约 30Ma 的时候,

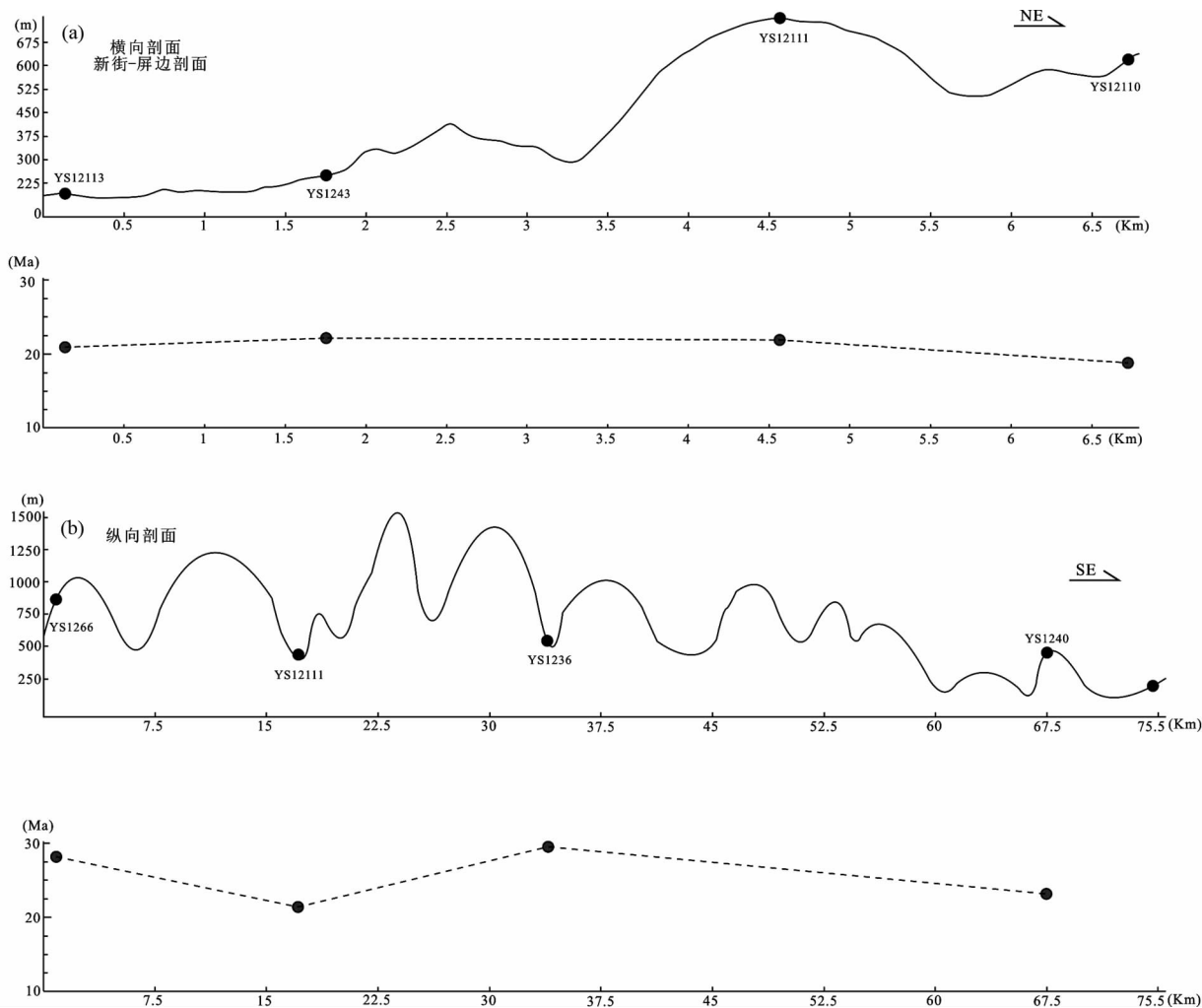


图9 采样地形剖面及沿着剖面裂变径迹年龄分布图

(a)垂直杂岩体走向剖面;(b)平行杂岩体走向剖面

Fig.9 Topographic profile and distribution of apatite fission track ages along the sections

(a) section perpendicular to the extension of the Yaoshan complex; (b) section parallel to the extension of the Yaoshan complex

瑶山杂岩就已经剥露到距地表4.3km处,继而存在三次抬升过程:30~25Ma,是一个快速的抬升过程,冷却速率为8~8.9°C/Myr;25~12.5Ma,是一个相对缓慢的抬升过程,冷却速率为1.5~1.9°C/Myr;从中新世约13Ma至今,抬升速度又开始加快,但小于第一阶段的速度,冷却速率为3.4~4.1°C/Myr。

(2)磷灰石裂变径迹分析结果显示,垂直于杂岩体延伸方向上,是一个整体,均匀的剥露过程;平行于杂岩体延伸方向上,剥露过程不是整体抬升的,而是一个不均匀的剥露过程。

(3)区域对比显示,瑶山杂岩与哀牢山、点苍山的低温剥露有较大的差别。同时,结合瑶山杂岩与大象山杂岩的低温年代学分析结果沿着瑶山-大象山杂岩体延伸方向上,从南东到北西,磷灰石年龄有逐渐变新的趋势,说明剥露具有穿时性;而在瑶山杂岩局部,剥露具有不均匀性,类似于波瓦状

剥露特点。

致谢 磷灰石裂变径迹实验分析得到中国地质大学(北京)袁万明教授和冯云磊博士的指导;同时得到评审人提出的宝贵意见;特此一并表示衷心感谢。

References

- Anczkiewicz R, Viola G, Müntener O, Thirlwall MF, Villa IM and Quong NQ. 2007. Structure and shearing conditions in the Day Nui Con Voi massif; Implications for the evolution of the Red River shear zone in northern Vietnam. *Tectonics*, 26 (2): TC2002, doi: 10.1029/2006TC001972
- Bellemans F, DeCorte F and Van Den Haute P. 1995. Composition of SRM and CN U-doped glasses; Significance for their use as thermal neutron fluence monitors in fission track dating. *Radiation Measurements*, 24(2): 153-160

- Cao SY, Liu JL, Leiss B, Neubauer F, Genser J and Zhao CQ. 2011a. 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. *Gondwana Research*, 19(4): 975–993
- Cao SY, Neubauer F, Liu JL, Genser J and Leiss B. 2011b. Exhumation of the Diancang Shan metamorphic complex along the Ailao Shan-Red River belt, southwestern Yunnan, China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(3): 525–550
- Chen W, Wan YS, Li HQ, Zhang ZQ, Dai TM, ShiZE and Sun JB. 2011. Isotope geochronology: Technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1917–1947 (in Chinese with English abstract)
- Chen XY, Liu JL, Tang Y, Song ZJ and Cao SY. 2015. Contrasting exhumation histories along a crustal-scale strike-slip fault zone: The Eocene to Miocene Ailao Shan-Red River shear zone in southeastern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 174–187
- Chen XY, Liu JL, Weng ST, Kong YL, Wu WB, Zhang LS and Li HY. 2016. Structural geometry and kinematics of the Ailao Shan shear zone: Insights from integrated structural, microstructural, and fabric studies of the Yao Shan complex, Yunnan, Southwest China. *International Geology Review*, 58(7): 849–873
- Chung SL, Lee TY, Lo CH, Wang PL, Chen CY, Yem NT, Hoa TT and Wu GY. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Geology*, 25(4): 311–314
- Clift PD, Blusztajn J and Duc NA. 2006. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam. *Geophysical Research Letters*, 33(19): L19403
- England P and Molnar P. 1990. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 344(6262): 140–142
- Faure M, Lepvrier C, Van Nguyen V, Van Vu T, Lin W and Chen ZC. 2014. The South China block-Indochina collision: Where, when, and how? *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 260–274
- Fitzgerald PG, Sorkhabi RB, Redfield TF and Stump E. 1995. Uplift and denudation of the central Alaska Range: A case study in the use of apatite fission track thermochronology to determine absolute uplift parameters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B10): 20175–20191
- Galbraith RF. 1981. On statistical models for fission track counts. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13(6): 471–478
- Gilley LD, Harrison TM, Leloup PH, Ryerson FJ, Lovera O and Wang JH. 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B2), doi: 10.1029/2001JB001726
- Green PF, Duddy IR, Laslett GM, Hegarty KA, Gleadow AW and Lovering JF. 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 79(2): 155–182
- Han SQ, Chen QL and Zhang YS. 2007. K-Ar dating of authigenic illite from gouge on north segment of Red River fault zone and its geological significance. *Quaternary Sciences*, 27(6): 1129–1130 (in Chinese with English abstract)
- Harrison TM, Chen WJ and Leloup PH. 1992. An Early Miocene transition in deformation regime within the Red River fault zone, Yunnan, and its significance for Indo-Asian tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 97(B5): 7159–7182
- Harrison TM, Leloup PH, Ryerson FJ, Tapponnier P, Lacassin R and Chen WJ. 1996. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River Shear Zone, Yunnan and Vietnam. In: Harrison TM and Yin A (eds.). *The Tectonics of Asia*. New York: Cambridge University Press, 208–226
- Jian P, Liu DY, Kröner A, Zhang Q, Wang YZ, Sun XM and Zhang W. 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. *Lithos*, 113(3–4): 767–784
- Jolivet L, Beyssac O, Goffé B, Avigad D, Lepvrier C, Maluski H and Thang TT. 2001. Oligo-Miocene midcrustal subhorizontal shear zone in Indochina. *Tectonics*, 20(1): 46–57
- Ketchum RA, Donelick RA and Carlson WD. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics; III, extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 84(9): 1235–1255
- Leloup PH, Harrison TM, Ryerson FJ, Chen WJ, Li Q, Taopponnier P and Lacassin R. 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4): 6715–6743
- Leloup PH, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong DL, Liu XH, Zhang LS, Ji SC and Trinh PT. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251(1–4): 3–84
- Leloup PH, Arnaud N, Lacassin R, Kienast JR, Harrison TM, Trong TTP, Replumaz A and Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B4): 6683–6732
- Leloup PH, Tapponnier P, Lacassin R and Searle MP. 2007. Discussion on the role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. *Journal of the Geological Society*, 164(6): 1253–1260
- Li BL, Ji JQ, Lo CH, Gong JF and Qing JC. 2012. The structural style and timing of uplift of the Ailaoshan-Diancang Range, West Yunnan, China. *Seismology and Geology*, 34(4): 696–712 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Song ZJ, Cao SY, Zhai YF, Wang AJ, Gao L, Xiu QY and Cao DH. 2006. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 775–786 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Wang AJ, Cao SY, Zou YX, Tang Y and Chen Y. 2008. Geochronology and tectonic implication of migmatites from Diancangshan, western Yunnan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 413–420 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Tang Y, Song ZJ, Tran M, Zhai YF, Wu WB and Chen W. 2011. The Ailaoshan belt in western Yunnan: Tectonic framework and tectonic evolution. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1285–1303 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Tang Y, Tran MD, Cao SY, Zhao L, Zhang ZC, Zhao ZD and Chen W. 2012. The nature of the Ailao Shan-Red River (ASRR) shear zone: Constraints from structural, microstructural and fabric analyses of metamorphic rocks from Diancang Shan, Ailao Shan and Day Nui Con Voi massifs. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 231–251
- Liu JL, Chen XY, Wu WB, Tang Y, Tran MD, Nguyen QL, Zhang ZC and Zhao ZD. 2015. New tectono-geochronological constraints on timing of shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for genesis of Ailao Shan gold mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 70–86
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419–426
- Nam TN, Toriumi M and Itaya T. 1998. P-T-t paths and post-metamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 290(3–4): 299–318
- Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Zhong DL and Ji SC. 1990. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(1–2): 65–77
- Schärer U, Zhang LS and Tapponnier P. 1994. Duration of strike-slip

- movements in large shear zones: The Red River belt, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 126(4): 379–397
- Searle MP. 2006. Role of the Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. *Journal of the Geological Society*, 163(6): 1025–1036
- Searle MP, Yeh MW, Lin TH and Chung SL. 2010. 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. *Geosphere*, 6(4): 316–338
- Sone M and Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia; New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 166–179
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Schärer U, Zhong DL, Wu HW, Liu XH, Ji SC, Zhang LS and Zhong JY. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343(6257): 431–437
- Viola G and Anczkiewicz R. 2008. Exhumation history of the Red River shear zone in northern Vietnam; New insights from zircon and apatite fission-track analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1–2): 78–90
- Wan JL, Li Q and Chen WJ. 1997. Fission track evidence of diachronic uplift along the Ailao Shan-Red River left-lateral strike-slip shear zone. *Seismology and Geology*, 19(1): 87–90 (in Chinese with English abstract)
- Wang PL, Lo CH, Lee TY, Chung SL, Lan CY and Yem NT. 1998. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan-Red River shear zone: A perspective from Vietnam. *Geology*, 26(10): 887–890
- Yuan WM, Hou ZQ, Li SR and Wang SC. 2001. Fission track evidence on thermal history of Jiama polymetallic ore district, Tibet. *Science in China (Series D)*, 44(Suppl. 1): 139–145
- Yuan WM, Carter A, Dong JQ, Bao ZK, An YC and Guo ZJ. 2006. Mesozoic-Tertiary exhumation history of the Altai Mountains, northern Xinjiang, China; New constraints from apatite fission track data. *Tectonophysics*, 412(3–4): 183–193
- Yuan WM, Du YS, Yang LQ, Li SR and Dong JQ. 2007. Apatite fission track studies on the tectonics in Nanmulin area of Gangdese terrane, Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2911–2917 (in Chinese with English abstract)
- Yumul Jr GP, Zhou MF, Wang CY, Zhao TP and Dimalanta CB. 2008. Geology and geochemistry of the Shuanggou ophiolite (Ailao Shan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: Evidence for a slow-spreading oceanic basin origin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 385–395
- Zhang BL, Liu RX, Xiang HF, Wan JL and Huang XN. 2009. FT dating of fault rocks in the central-southern section of the Red River fault zone and its geological implications. *Seismology and Geology*, 31(1): 44–56 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LS and Schärer U. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 67–85
- Zhang Q, Zhou DJ, Li XY, Chen Y, Huang ZX, Han S, Jia XQ and Dong JQ. 1995. Characteristics and genesis of Shuanggou ophiolites, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Suppl.): 190–202 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 刘文, 万渝生, 李华芹, 张宗清, 戴植谟, 施泽恩, 孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. *地质学报*, 85(11): 1917–1947
- 韩淑琴, 陈情来, 张永双. 2007. 红河断裂北段断层泥中自生伊利石 K-Ar 年龄及地质意义. *第四纪研究*, 27(6): 1129–1130
- 李宝龙, 季建清, 罗清华, 龚俊峰, 庆建春. 2012. 滇西点苍山-哀牢山隆升构造样式和隆升时限. *地震地质*, 34(4): 696–712
- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 翟云峰, 王安建, 高兰, 修群业, 曹殿华. 2006. 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. *岩石学报*, 22(4): 775–786
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 邹运鑫, 唐渊, 陈越. 2008. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域构造内涵. *岩石学报*, 24(3): 413–420
- 刘俊来, 唐渊, 宋志杰, Tran My Dung, 翟云峰, 吴文彬, 陈文. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1285–1303
- 万景林, 李齐, 陈文寄. 1997. 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. *地震地质*, 19(1): 87–90
- 袁万明, 侯增谦, 李胜荣, 王世成. 2001. 西藏甲马多金属矿区热历史的裂变径迹证据. *中国科学(D辑)*, 31(S1): 117–121
- 袁万明, 杜杨松, 杨立强, 李胜荣, 董金泉. 2007. 西藏冈底斯带南木林地区构造活动的磷灰石裂变径迹分析. *岩石学报*, 23(11): 2911–2917
- 张秉良, 刘瑞珣, 向宏发, 万景林, 黄雄南. 2009. 红河断裂带中南段断层岩 FT 测年及其地质意义. *地震地质*, 31(1): 44–56
- 张旗, 周德进, 李秀云, 陈雨, 黄忠祥, 韩松, 贾秀勤, 董金泉. 1995. 云南双沟蛇绿岩的特征和成因. *岩石学报*, 11(S): 190–202