

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^{*}

刘俊来¹ 宋志杰¹ 曹淑云¹ 翟云峰¹ 王安建² 高兰² 修群业² 曹殿华²

LIU JunLai¹, SONG ZhiJie¹, CAO ShuYun¹, ZHAI YunFeng¹, WANG AnJian², GAO Lan², XIU QunYe² and CAO DianHua²

1. 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

2. 中国地质科学院矿产资源战略研究中心, 北京 100037

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

2. Strategic Research Center of Mineral resources, Chinese academy of geological sciences, Beijing 100037, China

2005-12-20 收稿, 2006-02-24 改回.

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

Abstract Through detailed structural analysis of Cenozoic deformation in the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates, i. e. in the Three River region in eastern Tibet, three different structural styles are recognized. They are formed at different crustal levels in Cenozoic: 1) thin-skinned thrust faults and nappe structures developed from outcrop to regional scales. They are widely distributed in the Three River region, especially in Lanping-Simao basin; 2) regional high-temperature strike-slip ductile shear zones, exemplified by Red River-Ailao Shan, Lancang River and Nujiang River-Gaoligong Shan shear zones, and local brittle strike-slip faults. The latter are common in the Mesozoic and Cenozoic in Lanping-Simao basin. 3) Metamorphic core complexes and graben or half-subgraben basins are distributed all around in a fan-shaped area between the Red River-Ailao Shan and Sagaing shear zones. Regional magmatic activities are closely related to tectonic activities both temporally and spatially. Regional progressive shortening and strike-slip faulting occurred in the early stage of the collision process. They may have triggered the high potassium magmatism with subduction-related characteristics. Late stage progressive extension resulted in high-potassium magmatism of intraplate characteristics. A magmatic gap between the two periods of alkaline magmatic activities is in coincidence with the changing in regional tectonic systems and the occurrence of regional extension, which is shown directly by the exhumation of metamorphic core complexes and weak calc-alkaline magmatic activities. In combination with regional paleo-magnetic data, it is shown that the interaction between Indian and Eurasian plates, the rotation of regional plates and crustal blocks, and hence induced tectonic processes may provide constraints on the occurrence of different geological events. It is suggested that the clockwise and anticlockwise rotation of the northerly moving Indian plate gave rise to two stages of rotation of crustal blocks in the Three River region, an early large angle and high speed rotation and a late small angle and slow rotation. Such rotation of crustal blocks are the major cause of the early stage of progressive shortening, strike-slip faulting, and magmatic arc type alkaline magmatic activities, an intermediate stage of exhumation of metamorphic core complexes and calc-alkaline magmatic activities, and a late stage of progressive extension and intraplate alkaline activities.

Key words Oblique collision zone, Three River region, Eastern Tibet, Tectonic evolution, Magmatism

摘要 对于印度与欧亚板块的侧向碰撞带,即藏东三江地区的新生代构造分析揭示出三种不同性质的构造样式,它们形成于不同的地质时期,发育于不同的地壳层次:(1)区域规模至露头尺度上发育的具有薄皮属性的逆冲断层与推覆构造,它们广泛分布于三江地区,尤其是兰坪-思茅盆地内;(2)以红河-哀牢山断裂、澜沧江和怒江-高黎贡山断裂等为代表的区域高温型走滑韧性剪切带构造和局部发育的脆性走滑断裂构造,后者在中新生代盆地内部断裂更为发育;(3)遍布全区发育的变

^{*} 国家重点基础研究发展(973)计划(编号:2002CB412607)资助.

第一作者简介:刘俊来,男,1960年12月生,构造地质学专业,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为构造地质学和构造物理学, E-mail: jliu@cugb.edu.cn

质核杂岩构造与地堑-半地堑盆地。区域岩浆活动性与区域构造事件的发生具有密切的时空联系。区域性递进收缩事件与走滑事件发生于碰撞过程的早期阶段,并随后伴随着早期具有岩石圈板块俯冲性质的碰撞弧高钾岩浆活动,而后期的递进伸展事件诱发了板内伸展环境中的晚期高钾岩浆活动。二者之间的碱性岩浆活动间歇期,对应着区域构造体制的转变与区域伸展作用的发生,变质核杂岩的发育与微弱的钙碱性岩浆活动是其最直接的表现。区域古地磁资料分析表明,印度-欧亚板块之间的板块相互作用、区域板块与地块的旋转以及由此所致的不同构造环境制约着各种地质事件的发生与发展。北向运动的印度板块的旋转致使三江地块在新生代演化中发生了两次规模与特点不一的地块旋转过程,即早期的大角度快速旋转和晚期的小角度慢速旋转事件。它们分别对应于早期的递进收缩变形、走滑事件和具有碰撞弧属性的碱性岩浆活动与中期的区域伸展、变质核杂岩的发育与微弱的钙碱性岩浆活动性,以及后期的递进伸展作用和晚期陆内碱性岩浆活动性。

关键词 侧向碰撞带;三江地区;藏东;构造演化;岩浆活动

中图法分类号 P542.4; P546; P588.115

发生在大约 55Ma 的印度-欧亚板块碰撞与其后发生的后碰撞过程是东亚地区岩石圈结构形成与演化中的重要事件 (Molnar and Tapponnier, 1975; 季建清等, 2000; Maluski *et al.*, 2001; Morley, 2002; 孙珍等, 2003)。青藏高原的隆升 (Harrison *et al.*, 1992; Turner, *et al.*, 1993; Coleman and Hodge, 1995)、高原及周缘造山带(如三江新生代造山带)的形成,都直接受碰撞过程与后碰撞岩石圈结构调整等大陆动力学过程制约 (England and Molnar, 1990; Chung *et al.*, 1998; Burchfiel and Wang, 2003)。

碰撞与后碰撞时期板块间的相互作用是一个复杂过程。一方面,不同演化阶段板块相互作用有着不同的作用表现,包括了早期的弧-陆碰撞、中期的陆-陆碰撞、晚期的俯冲作用和岩石圈板片断离过程等 (Lee and Lawver, 1995; 滕吉文等, 1997; 周华伟等, 2002; Maheo *et al.*, 2002)。另一方面,在印度-欧亚板块相互作用过程中,不同地区与不同构造部位在演化历史上表现出显著的差异性。喜马拉雅地区一直处于正向碰撞与俯冲过程,向北远离主碰撞带,碰撞作用的远程效应明显减弱 (Sobel and Dumitru, 1997; Jolivet *et al.*, 2001)。东喜马拉雅构造结(南迦巴瓦地区)东南部的三江与中南半岛地区和西喜马拉雅构造结(Nanga Parbat 地区)以西巴基斯坦地区,在遭受了早期的正向碰撞之后却经历了后期演化阶段的侧向碰撞与斜向俯冲过程 (Bertrand and Rangin, 2003; Khan *et al.*, 2000)。正是由于这些基本岩石圈过程的转变,致使不同构造域在碰撞与后碰撞过程中出现了差异非常大的构造环境转变,并发育了具有不同属性的构造-岩浆组合 (Johnson, 2002; Bertrand and Rangin, 2003)。

本文从藏东三江地区基本构造格局和构造演化的基本特征出发,重点结合兰坪和点苍山地区的构造特点与构造-岩浆关系分析,阐明从正向碰撞向侧向碰撞转化过程及转化后的演化过程中不同阶段的构造活动性与构造-岩浆演化。

1 区域地质背景

印度-欧亚侧向碰撞带主要包括了以红河-哀牢山断裂为东界、以实皆断裂(Sagaing fault)为西界的扇形地域。其西侧为西缅地块,东侧为扬子地块。在这一扇形地域内,大小块

体众多,地质结构复杂。主要可以划分为两个大的一级构造单元,即掸泰地块和印支地块,前者具有亲冈瓦纳属性,而后者具亲扬子属性 (Feng *et al.*, 2005; 刘本培等, 2002)。同时,地块之间及内部还发育有众多不同时代的断裂与断裂带构造。

掸泰地块西界为实皆断裂,东界为昌宁-孟连-清迈缝合带及庄他武里-劳勿蛇绿岩带。中国境内的腾冲、保山地块是掸泰地块的北延部分,其中主要发育了古生代浅海相碳酸盐岩和陆源碎屑岩为主的沉积组合和早二叠世亲冈瓦纳型生物地层组合 (钟大赉等, 1998)。

高黎贡山位于腾冲地块和保山地块之间,主要由高黎贡群和浅变质的潞西带组成。其中,高黎贡群总体上经历了角闪岩相变质作用和韧性剪切作用,形成了宽达 5km 的糜棱岩带。韧性剪切显示为右行走滑运动为主,活动时间为 12 ~ 20Ma (钟大赉等, 1991; Wang and Burchfiel, 1997)。高黎贡韧性剪切带南延与 Mogok-瑞丽断裂和实皆断裂相连,是藏东地区新生代演化的重要边界断裂 (Tapponnier and Molnar, 1976; Burchfiel and Wang, 2003; Anne Socquet and Manuel Pubellier, 2005)。潞西带晚三叠世至早侏罗世时期为陆间海槽,有深水型碎屑浊积岩沉积组合 (钟大赉等, 1998)。与邻近的高黎贡群截然不同,潞西带仅仅经历过浅变质作用。

印支地块主体位于中南半岛,西界为昌宁-孟连-清迈缝合带及庄他武里-劳勿蛇绿岩带,东界为马江缝合带。在三江地区自西向东可划分为三个次级构造单元:临沧花岗岩带、澜沧江断裂带和兰坪-思茅盆地。临沧花岗岩带规模宏大,长度数百公里,宽度数十公里,呈南北向展布,其主体是黑云母二长花岗岩,多属于 S 型花岗岩。澜沧江西侧 0.5 ~ 5km 内为韧性剪切带,糜棱面理走向近南北向 (钟大赉等, 1998)。澜沧江断裂带与红河-哀牢山断裂带之间为兰坪-思茅盆地,盆地内主要发育了中、新生代为主的地层,其中中上三叠统以碳酸盐岩、碎屑岩以及浊积岩为主,中侏罗世以后转为陆相,以红层、石膏岩、盐岩和煤系为主。盆地内部构造广泛发育了早期的逆冲断层、推覆构造与晚期的走滑断裂构造。

2 基本构造样式

三江地区的基本构造轮廓,表现为红河-哀牢山、澜沧江

和怒江-高黎贡断裂带的线性发育,以及介于其间的复杂构造组合。依据区域构造的主要特点及其相互间的叠加和改造关系,在三江地区识别出三组具有不同特点和成因属性的基本构造型式(图 1a)。

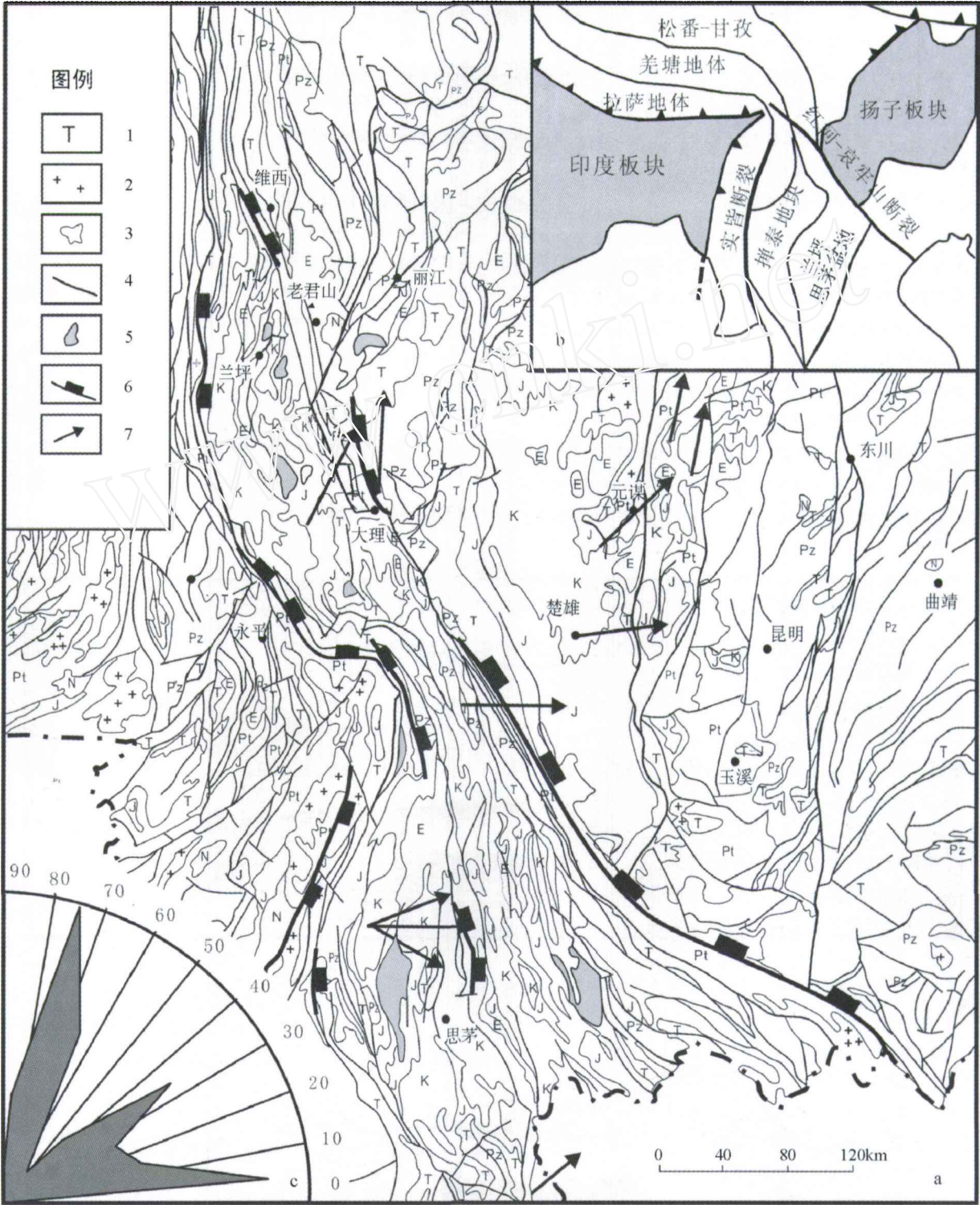


图 1 三江地区地质简图(a),欧亚板块碰撞带构造简图(b)和兰坪盆地断层面侧伏角统计图(c)
1-地层时代符号; 2-花岗岩体; 3-地质界线; 4-断层; 5-实测和推测的推覆体; 6-实测和推测的变质核杂岩; 7-古地磁资料示局部地块旋转角度
Fig. 1 Simplified geological map of the Three River region(a), Simplified tectonic map of the Indo-Eurasian collision zone(b) and Rose diagram of pitch angles of faults in Lamping basin(c)

2.1 区域性收缩构造型式

大规模收缩构造是印度与欧亚板块碰撞过程最直接的表现(Johnson, 2002)。近南北向的缩短导致了残余特提斯洋的消亡以及消亡后的区域性挤压造山过程。在主碰撞带,即青藏高原腹地和喜马拉雅地区,收缩作用形成大规模缝合带与碰撞带。在侧向碰撞带,如三江地区,前渐新世地层同样卷入了收缩变形,形成不同规模的逆冲断层和推覆构造组合。

逆冲推覆构造是藏东三江地区最为普遍的构造型式之一,从区域到露头不同尺度上均有发育(图1a)。区域规模的推覆构造是三江地区,尤其是兰坪-思茅盆地及其东缘最为显著的格架性构造型式。典型构造包括鹤庆、兰坪、剑川、云龙、无量山(图2b)、南涧、普洱和李仙江等地区的推覆构造(吴根耀,1994;沙绍礼等,2004;段建中,1999;王世锋,王二七,2005)。宏观上推覆构造的异地系统主要为三叠系,局部为更老(泥盆系或奥陶系)或较新(侏罗系、白垩系)地层,它们整体或仅仅部分层段进入外来系统(图2)。原地系统的地层年代相对较新,目前发现的最新地层主要包括了古近纪地层系统(如兰坪地区的云龙组 and 鹤庆地区的丽江组)。

以兰坪金顶铅锌矿区为例,主矿区内发育了三叠纪至古近纪等不同时代的地层,它们以一系列构造岩片的方式堆叠在一起,并打乱了基本层序。据钻孔资料,由深部至浅部依次发育了J₂h杂色粉砂岩、泥岩组合,T₃s沥青质灰岩,K₁j钙质砂岩,J₂h杂色粉砂岩、泥岩组合和T₃s₂白云质灰岩组合。其中尤为显著的现象是,最上层岩片T₃s₂白云质灰岩构成的飞来峰构造在矿区内频繁出现。各岩片单元之间均以逆冲断层或断层带接触,断层带内可以发育有厚达1m的断层泥与碎裂岩组合。结合断层面上擦痕与岩层产状测量,揭示出主要滑移方向为上盘滑向SE(图2a)。

三江地区的推覆构造具有薄皮构造的特点。卷入推覆构造异地系统的地层主要是三叠系及其以上的地层单元,少数情况下可以见到较老地层(如泥盆系或奥陶系、寒武系,吴根耀,1994;李光勋,1994)卷入推覆构造。从构成推覆构造的岩石变形与变质特点分析,无论是原地抑或异地系统内的岩石单元,从奥陶系到白垩系,主体上是一套未遭受变质作用改造的浅部地壳岩石。然而,这套岩石却遭受了强烈变形作用,主要表现为常见地层单元,如三叠系灰岩与中酸性火山岩岩层、侏罗系砂岩、粉砂岩与泥岩岩层和白垩系砂岩层,普遍经过破裂与断层作用的改造。

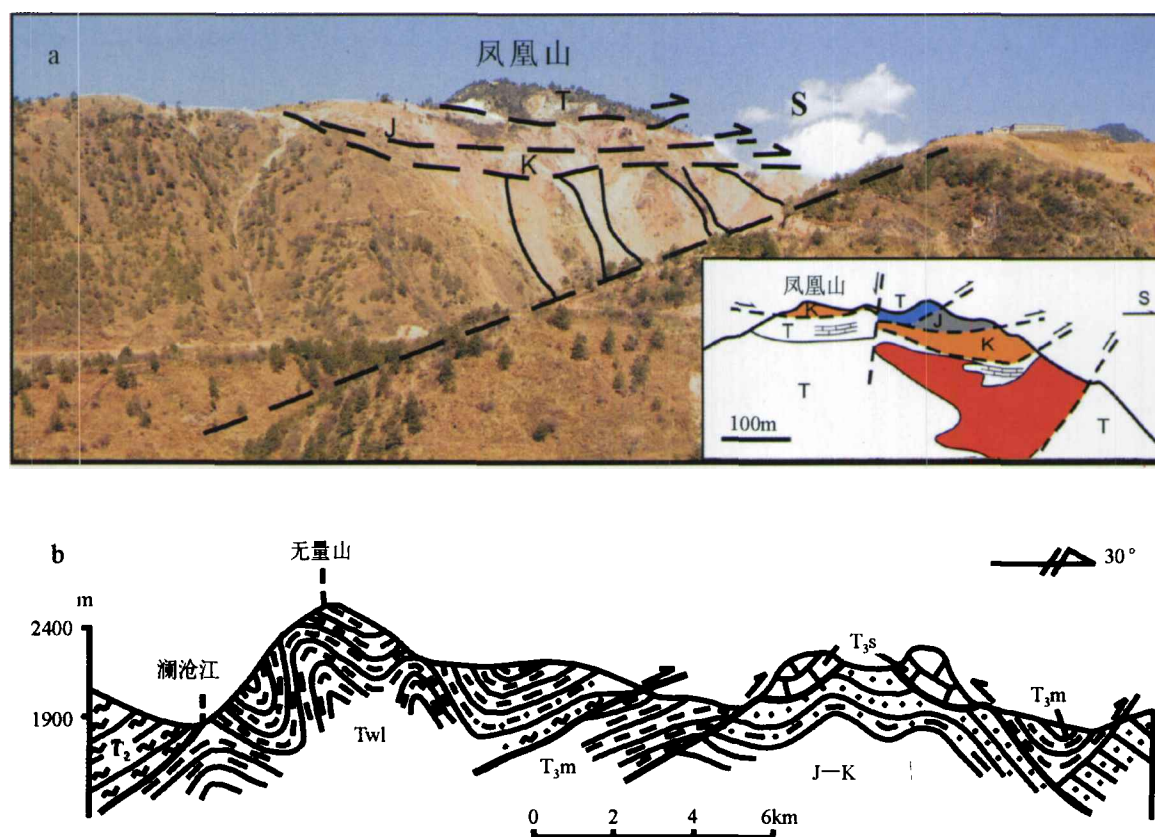


图2 三江地区两个典型的推覆构造

a-兰坪金顶凤凰山推覆构造; b-无量山推覆构造(据段建中,1999)

Fig. 2 Two typical nappe structures in the Three River region

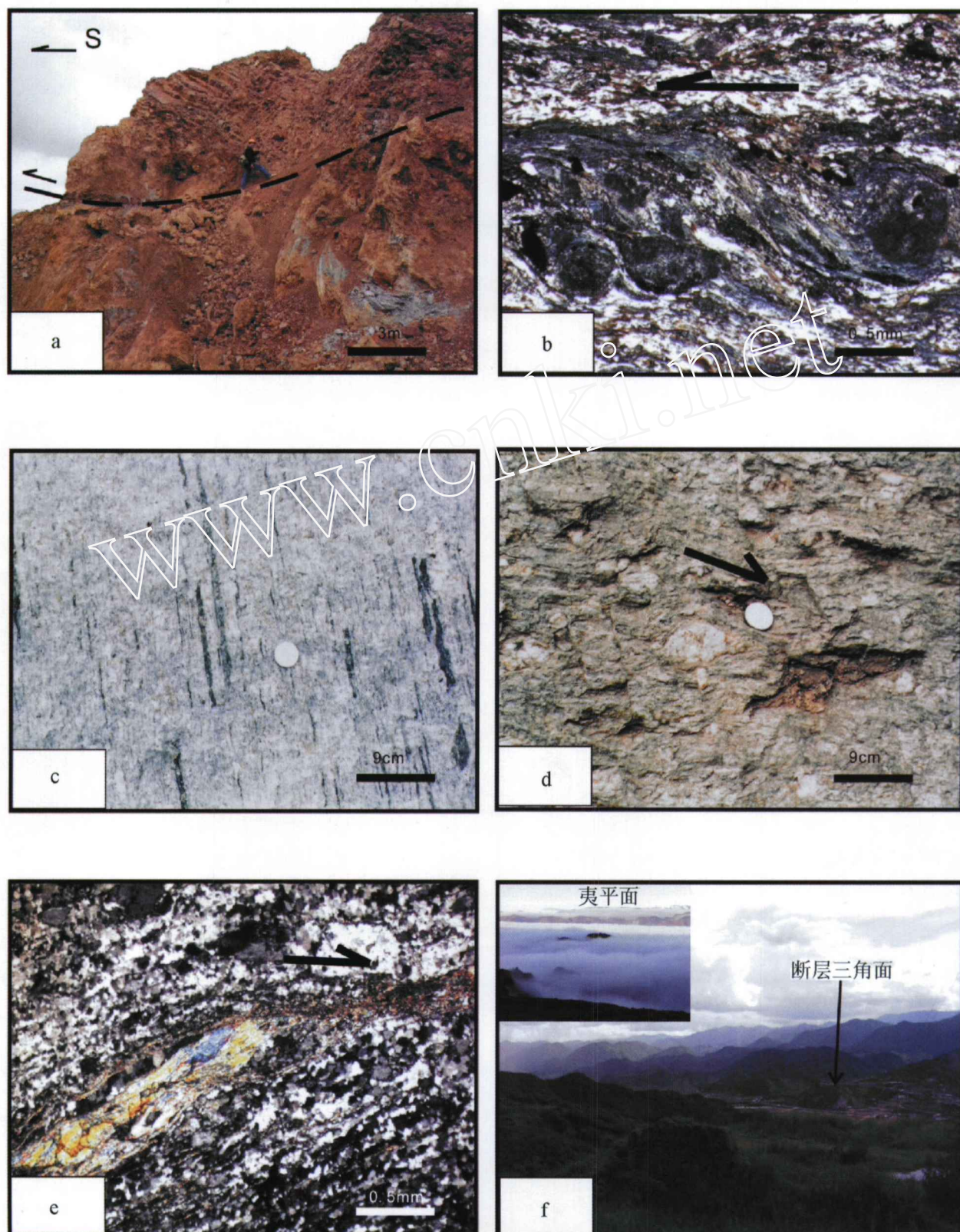


图3 不同性质的变形构造与微构造现象

a-露头尺度逆冲推覆构造；b-角闪岩相 S-C 组构(角闪石与斜长石构成)；c-剪切花岗岩及其中的闪长岩包体构成杆状拉伸线理；d-剪切花岗岩中的斜长石残斑构成 σ 组构；e-花岗岩糜棱岩中的 S-C 组构，石英动态重结晶，绢云母等构成 C 面理；f-兰坪地堑远眺

Fig.3 Geological structures and microstructures formed at different tectonic setting

与推覆构造相伴出现的是在三江地区普遍发育的、不同尺度上的逆冲断层构造。对于兰坪盆地 127 条断层面的构造测量结果揭示出,断层擦痕侧伏角变化于 $5^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间,其中侧伏角在 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间的擦痕具有一个显著的峰值(图 1c)。观察分析结果显示,这些具有大侧伏角的断层,主要是具有上盘上升特点的高角度或低角度逆断层。逆冲断层具有递进发育与演化的特点,不同阶段的逆断层以及与推覆构造之间具有叠加关系。高角度逆冲断层既可以发育于推覆构造的前缘,也可以叠加于推覆体内。而与推覆作用相伴出现的低角度逆冲断层常常叠加在高角度逆冲断层之上。

逆冲断层构造总体走向近 N-S,上盘滑移方向指向 E 或 W。推覆构造上盘的滑移方向与滑移距离在不同地区有所差别,但总体指向 SW 或 NE(图 2,图 3a),与扬子板块和印度板块之间的相对斜向汇聚密切相关。

尽管一些小型尺度的逆断层可以发育于三江褶皱带演化的不同阶段,但宏观上大规模的逆冲推覆构造主要发育于褶皱带演化的早期阶段。早期发育的逆冲断层与推覆构造,普遍遭受了后期区域走滑断层作用与伸展作用的改造。

2.2 区域性走滑断裂构造

走滑断裂构造是三江地区最为特色的构造型式。区域走滑构造型式有两种不同的表现,即相对较早阶段的下地壳韧性走滑剪切带和较晚阶段中上地壳层次的脆性走滑断裂构造。尽管对于它们发育的时间、动力学背景和二者间的转换关系目前还是一个存有争议的重要问题,但是对于它们的存在及其对于区域构造演化中的地位和作用却是一个不可争辩的事实(Tapponnier *et al.*, 1986, 1990; 钟大赉等, 1989; Zhong *et al.*, 1990; Leloup *et al.*, 1995; 张连生和钟大赉, 1996)。早期走滑构造以红河-哀牢山左行韧性剪切带为代表,在澜沧江、高黎贡山等三江地区的主要断裂带上发育性质和特点相近的韧性走滑变形构造型式。而晚期的走滑断裂构造在多数地区普遍存在,包括具有右行特点的红河断裂,以及广布于全区且具有同向滑移的小侧伏角走滑断层。

红河-哀牢山走滑断裂带,作为一条发育于中下地壳层次的韧性剪切带,主要分布在雪龙山、点苍山和哀牢山山系的核心部位,由强烈变形的(元古宙)深变质岩系构成,包括一套角闪岩相的高温变质岩石组合,如斜长角闪岩、夕线榴石片麻岩、云母片岩和金云橄榄大理岩等。岩石中的高温矿物组合:夕线石+石榴石+十字石+蓝晶石、角闪石+斜长石(图 3b)、透辉石+透闪石+橄榄石等构成岩石的主叶理和线理构造。局部可以见到下地壳部分熔融作用产生的花岗质脉体物质沿着叶理注入并被进一步改造的迹象。侵入于变质岩系中的大规模花岗岩和二长花岗岩体同时遭受了强烈剪切变形改造。

变形的深成岩中具有微弱发育的叶理与极其发育的线理构造是哀牢山剪切带最典型的构造特点。花岗质岩石与其中的闪长岩包体同时遭受强烈变形作用改造,形成由矿物

集合体(或包体)构成的杆状线理(图 3c)。因而主要发育了叶理微弱而线理强烈的 L 构造岩。利用花岗质岩石中闪长岩包体和部分矿物集合体作为标志物测定的应变椭圆体具有典型的拉伸应变特点。值得注意的是,构成这样一组线理的主要矿物,包括角闪石、石英和长石等多种造岩矿物,普遍不具有典型的品质塑性变形现象(如波状消光、变形纹、亚颗粒和动态重结晶构造),而代之以反映高温作用过程的晶体生长和变质反应的微构造表现(如蠕英结构等广泛发育, Vernon, 2000)。以线状矿物为主组成的斜长角闪岩类岩石中,除由角闪石构成强烈的线理构造外,还可以见到微弱的叶理构造。在片状矿物发育的剪切变质岩中,尽管线理依然是最主要的构造型式,但叶理具有同等重要的地位。分熔作用产生的花岗质脉体常常弯曲形成塑态流动褶皱,剪切作用强烈时发育鞘褶皱。在大理岩中,叶理和线理均不十分发育,主要表现为强烈的塑性流动所致各种柔流褶皱,并在宏观上呈现出由各种成分条纹或条带(如石墨暗色条纹)的弯曲所构成的精美流动图案。

剪切变形的岩石中,线理构造具有全区的同一性,无论在哀牢山,还是在点苍山,以及雪龙山,主体产状均为具有较小的侧伏角,倾伏向 NW 或 SE。在具有叶理的剪切变质岩中, S-C 组构和 σ 与 δ 组构等不对称组构型式揭示出左行走滑剪切的特点。而构成这些不对称组构的主要矿物,是一些高温条件下稳定的矿物组合(斜长石、角闪石、石榴石等)。

2.3 区域性伸展构造

伸展构造在三江地区及邻区(东南亚地区)普遍发育,伸展构造最主要的表现形式为变质核杂岩和地堑构造(图 1, 3f)。在红河-哀牢山断裂带与实皆断裂带间的扇形域内,已经有多次报道变质核杂岩的存在,并合理地解释了这一地区零散分布的下地壳深变质岩石的剥露机制,例如云南雪龙山、点苍山、哀牢山(Tapponnier *et al.*, 1990; 王义昭等, 2000)、澜沧江和西盟杂岩,越南、泰国以及缅甸的 Day Nui Con Voi 杂岩(Tran Ngoc Nam *et al.*, 1998)、Mogok 片麻岩带、Doi Inthanon-Doi Suthep 杂岩和 Bukhang 穹隆(Morley, 2002)。

点苍山变质核杂岩是三江地区的一个典型的,但发育不完整的变质核杂岩构造,由三部分构成:下盘深变质杂岩和侵入于下盘变质杂岩的同运动侵入体、上盘未变质的古生界地层,以及介于上下盘之间的拆离断层带。

下盘岩石为一套高温糜棱岩,由糜棱岩化改造的元古宙斜长角闪岩、片岩、片麻岩和大理岩构成。岩石中的石英常常具有不规则颗粒边界,反映出高温颗粒边界迁移重结晶作用。长石颗粒被拉长,部分双晶化或动态重结晶,形成 S-C 组构中的 S 叶理。相对富钙的斜长石交代钾长石构成蠕英结构,说明这是在结晶固相线条件下发生的晶体塑性变形(Vernon, 2000)。云母颗粒(黑云母或白云母)可以构成 S-C 组构中的 S 或 C 叶理。在斜长角闪岩中,具有一定定向性的

角闪石颗粒构成 σ 或 δ 组构的主晶,而其他方向上的角闪石颗粒则构成拖尾。同运动侵入的二长花岗岩岩体具有典型的似斑状结构,在接近拆离断层带处,遭受具有右行滑移特点的正滑剪切变形作用的改造,表现为长石颗粒常常被脆性破裂改造,石英颗粒常常经过晶质塑性变形(波状消光、变形纹、亚颗粒旋转动态重结晶和细粒化等)。伴随变形作用,发育有铁镁矿物的绿泥石化和绢云母化。

拆离断层带是一条厚度大于1500m的糜棱岩带,其东侧被上新世以来的脆性断层带所切割。绿片岩相和低绿片岩相糜棱岩构成拆离断层带的主体。绿色黑云母、绿泥石、绢云母、钠长石和石英广泛发育于拆离断层带糜棱岩中。石英普遍遭受亚颗粒旋转动态重结晶作用,绿色黑云母和阳起石颗粒构成糜棱岩极其发育的叶理构造。长石颗粒常常呈脆性变形特点,一般情况下构成 σ 或 δ 残斑(图3c)。绢云母则构成S-C糜棱岩的C叶理构造(图3d)。拆离断层带糜棱岩为典型的SL构造岩,具有同等发育的叶理和线理构造。

变质核杂岩的上盘由未变质和弱变形的古生界地层单元构成,包括了奥陶系和石炭—二叠系。尽管岩层产状有一定变化,但这种变化与拆离断层作用没有直接关系。

三江及邻区变质核杂岩的剥露时间,是人们广泛讨论的一个重要问题。剥露时间的非均一性已经为人们所接受。除了个别年龄数据较老,大于30Ma(Bu Khang 穹隆, Jolivet *et al.*, 1999),区域变质核杂岩的主体剥露时间普遍认为介于27~16Ma之间(Day Nui Con Voi, 29~24Ma, Tran Ngoc Nam *et al.*, 2001; Mogok, 26~14Ma; Doi-Inthanon-Doi-Suthep, 27~16Ma, Barr *et al.*, 2002, Morley, 2001; 点苍山, >23~8Ma, Leloup *et al.*, 1995)。虽然对于哀牢山、点苍山变质杂岩中下地壳岩石演化的机制尚有分歧,但岩石的冷却年龄却提供了岩石剥露的年代学约束(图4b)。

3 构造-岩浆演化相关问题的讨论

3.1 三江地区岩浆活动性质与区域构造环境

三江地区新生代岩浆活动性具有显著的时空分异性(Wang *et al.*, 2001, 王江海等, 2001, 2002)。两阶段碱性岩浆发育的特点已经被大量同位素测年结果所证实,即42~24Ma的早期阶段和16Ma至今的晚期阶段(图4a)。在两个阶段之间,存在一个没有显著碱性岩浆活动的间歇阶段。两阶段的岩浆活动性具有显著的空间分布差异。前者主要分布在红河-哀牢山断裂带及其以东地区,最近在兰坪盆地内部也有报道(西部边缘永平与东部边缘巍山,董方浏等, 2005),而后者却在三江地区,尤其是兰坪-思茅盆地内广泛分布。

两阶段岩浆活动性具有显著的地球化学学习性差异,反映出不同的岩浆源区特点。后者在很大程度上是受大地构造环境与演变所制约。早期阶段岩浆活动性(如洱海高钾火山岩, 42~24Ma, 夏萍和徐义刚, 2004)具有与后碰撞(赵欣等,

2004)板块俯冲作用密切相关的地球化学证据(Wang *et al.*, 2001; 王江海等, 2001, 2002; 夏萍和徐义刚, 2004),即富集LILE, 亏损HFSE, TiO_2 含量低(<1%)、较高初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.7064~0.7094)和负 ϵ_{Nd} 值(-3.84~-4.64),岩浆源区来自加厚的岩石圈下部(>55km, 赵欣等, 2004),是后碰撞弧岩浆活动的表现(王建等, 2003; 赵欣等, 2004)。而晚期阶段岩浆的源区具有亏损地幔减压熔融作用过程的表现(Wang *et al.*, 2001; 王江海等, 2001, 2002),与板内高钾岩浆岩具有很大的相似性(夏萍和徐义刚, 2004)。岩石(如马关富钾火山岩, <16Ma, 夏萍和徐义刚, 2004)具有OIB型微量元素特征,即 TiO_2 含量高(>2%)、具有低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.7041~0.7060)和正的 ϵ_{Nd} 值(5.46~7.03)。

3.2 构造活动的阶段性与属性

对于古老造山带的构造分析可以揭示出多个不同阶段的构造型式与构造演化,而且更多地将造山带的发育与演化归结为区域性收缩作用的结果,而近年区域伸展构造的研究揭示出,后收缩(造山)伸展作用是区域性碰撞造山带的一种重要事件与作用过程(Coleman and Hodges, 1995; Searle, 1995; Dewey, 1988; Thompson *et al.*, 2001)。对于三江侧向碰撞构造带的构造分析揭示出,在现今正在发育的侧向造山带的演化历史,似乎远远比我们以前所认识的古造山带的演化历史复杂。多阶段收缩造山作用、区域性走滑事件和后造山伸展事件等在侧向碰撞造山带的演化过程中都曾经发育,并在其演化历史的不同阶段成为主导性的构造事件。

区域性收缩事件在三江地区表现为不同规模的逆冲断层与推覆构造的发育(图2, 图3a)。区域构造解析,尤其是构造叠加关系揭示出,收缩构造可以在不同阶段发育,但是主体阶段发育于区域构造演化的最早期阶段。在三江地区大型逆冲断层与推覆构造叠加在古近纪早期(古新世—始新世早期)陆间或陆内的沉积盆地,并相伴发育了古近纪晚期(始新世末与渐新世)山前磨拉石建造(陶晓凤等, 2002)。收缩构造组合破坏了自晚中生代(侏罗纪)以来的沉积组合的连续性,改造了古近纪沉积盆地的原型而使之成为肢解的残余盆地,如新生代剑川-兰坪盆地(刘俊来等, 2004)。

走滑作用在以红河-哀牢山断裂为代表的主要边界断裂上表现最为显著。左行走滑作用主要发育于哀牢山断裂带中,属于角闪岩相变质环境条件下发育的韧性剪切变形带,为下地壳岩石流动的具体体现(图3b, c)。而右行走滑作用主要发育在哀牢山变质岩带的东缘,即红河断裂带上,是地壳浅部层次剪切变形的表现(图3d)。对于哀牢山-红河走滑剪切带的左行与右行剪切作用各自的发育时间和走滑位移、从左行走滑向右行走滑的转变以及走滑作用的区域构造属性等,长期以来一直是有争议的焦点问题。但基本事实在于,哀牢山深变质岩带属于一套下地壳环境条件下剪切变形的构造岩带,任何关于左行走滑事件的结论必须考虑到下地壳岩石的剥露机制,这一点也正是被多数学者忽视或没有合

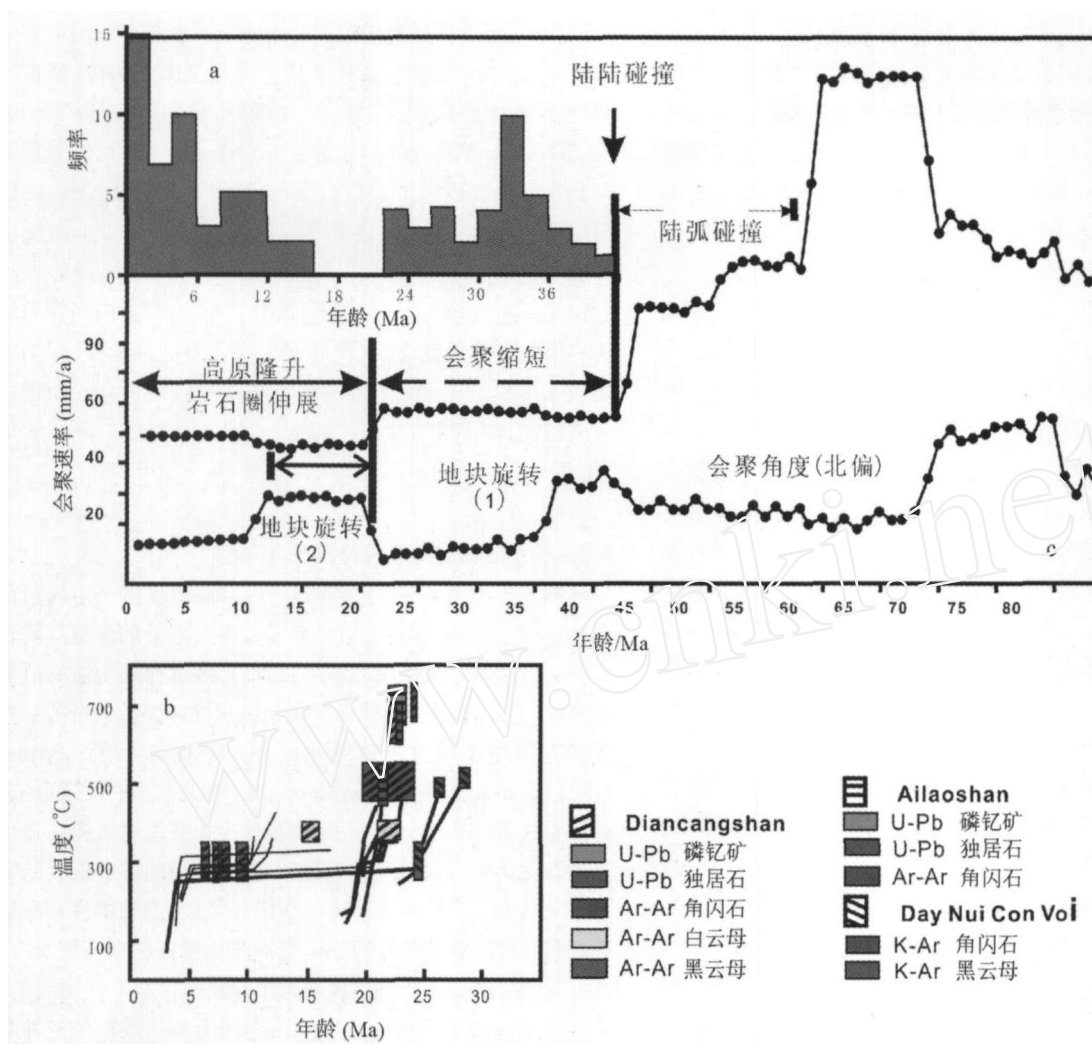


图4 三江地区碱性火成岩活动年龄分布(a)(据 Wang *et al.*, 2001 修编),红河-哀牢山一带深变质杂岩剥露热年代学资料汇总(b)(数据来源: Harrison *et al.*, 1997; Leloup *et al.*, 1993, 1995; Tran Ngoc Nam *et al.*, 1998)和印度板块运动速度与运动方向变化(c)(据 Lee *et al.*, 1994 修改)

Fig. 4 Ages of alkaline igneous activities(a) (revised from Wang *et al.*, 2001), thermal chronological data for the exhumation of high grade rocks along the Red River and Ailao Shan zone (b) (data source: Harrison *et al.*, 1997; Leloup *et al.*, 1993; 1995; Tran Ngoc Nam *et al.*, 1998) and Variation of velocity and direction of movement of the Indian plate determined from paleomagnetic data(c) (revised from Lee *et al.*, 1994)

理解的关键问题之一。另一方面,哀牢山深变质岩中角闪石、云母和钾长石的热年代学年龄,更多地提供了下地壳岩石剥露与隆升过程的年代学信息,而不是对走滑运动时间的精确限定(图4b)。当然,哀牢山和雪龙山侵入于剪切带内并被改造的花岗质脉体内的独居石和Ti-U氧化物的U-Pb测年获得的最老年龄为 31.3 ± 0.3 Ma和 33.1 ± 0.2 Ma。它们代表了沿着红河-哀牢山剪切带韧性剪切作用和递进变质作用的最小年龄(Leloup *et al.*, 2001)。

起始岩石圈伸展作用在三江地区最直接的表现,是发育了以变质核杂岩和地堑系为代表的区域伸展构造。变质核杂岩星散分布于红河-哀牢山断裂带与实皆断裂带间的扇形区内,以下地壳岩石在地表的直接裸露为表现,说明伸展作用影响到下部地壳。伸展方向为近东西向,但在不同地区有

微小的变化。利用不同矿物Ar-Ar测年揭示的热年代学数据 displays 伸展作用剥露的时间主要介于27~15 Ma,与区域上的岩浆活动间歇期对应(图4)。

3.3 岩石圈板块旋转与区域构造发育

三江地区新生代构造演化最为显著的特点之一在于岩石圈板块的旋转以及由它们之间的交互作用引起的地块旋转,古地磁资料提供了最有力的证据(图1a, Funahara *et al.*, 1992; 1993; Huang and Opdyke, 1993; Chen *et al.*, 1995)。对于云龙地区20个取样点处白垩系南新组砂岩和粉砂岩获得的数据揭示出 $36.3 \pm 13.6^\circ$ 的顺时针旋转(Sato *et al.*, 1999),取自兰坪和云龙地区始新世地层的样品记载了相对于扬子地块发生了约 40° 的顺时针旋转(Sato *et al.*, 2001)。

古地磁资料还揭示出三江地区两阶段具有不同特点的旋转事件(Chen *et al.*, 1995)。以欧亚板块(包括扬子板块)作为参考系,Chen *et al.* (1995)发现自白垩纪以来思茅地块发生了巨量旋转。他们报道的白垩系平均旋转量为 $R = 86.1^\circ (\pm 9.9^\circ)$, 始新世和渐新世平均旋转量为 $R = 76.8^\circ (\pm 11^\circ)$, 而中新世平均旋转量为 $R = 14.7^\circ (\pm 10.0^\circ)$ 。显见兰坪-思茅地块的旋转有两阶段性, 即自晚白垩世至始新世期间的快速旋转 ($3 \sim 33^\circ/\text{Ma}$) 和中新世以来的缓慢旋转 ($2 \sim 77^\circ/\text{Ma}$)。

另一方面, 地块旋转主要发生在三江及以西地区, 东侧毗邻的扬子地块并未发生显著的旋转, 而代之以向南大距离的位移。古地磁资料证实了在扬子地块上存在逆时针(元谋白垩系为 26°) 或 0° (大理白垩系 0°) 旋转的迹象(Otofuji *et al.*, 1998)。同时, 对于海南的古地磁资料分析显示, 应用古磁极分析和古纬度计算可以判断, 自白垩纪以来海南相对于华南发生了 $4.0 \pm 5.8^\circ$ 逆时针旋转和 $14.1 \pm 5.5^\circ$ 南向位移(Liu and Morinaga, 1999)。

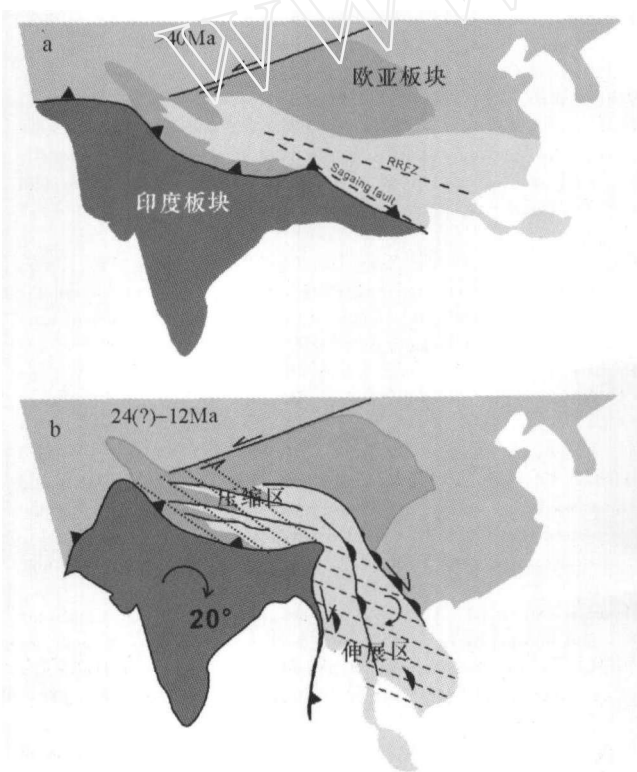


图5 藏东侧向碰撞带新生代演化

a-印度板块与欧亚板块的正向碰撞, 早期阶段收缩构造的形成与深部红河-哀牢山断裂带(RRFZ)和实皆断裂(Sagaing fault)带的发育;b-印度板块的顺时针旋转诱发藏东地区发生低速率伸展, 发育变质核杂岩构造

Fig. 5 Cenozoic evolution of the oblique collision zone in eastern Tibet

3.4 构造岩浆活动的区域大地构造环境

印度板块与欧亚板块之间的碰撞造山过程在藏东侧向碰撞带有着复杂的表现, 涉及多种不同的板块(地块)交互作用过程。多阶段收缩造山作用、走滑作用、伸展作用与岩浆活动性, 它们直接受区域岩石圈板块与地块旋转过程中印度洋岩石圈板块的正向与斜向俯冲、俯冲大洋板块的回退等因素所制约。

印度板块与欧亚板块的初始碰撞始于55Ma前后。或许是由于初始碰撞并非平直接触的缘故, 使得碰撞后的印度板块的向北运动方向在不断地改变中。结合Lee *et al.* (1994, 图4c)开展的古地磁资料分析, 印度板块自55Ma以来的运动方向一直是 $N23^\circ \sim 25^\circ E$, 直到44~42Ma时期, 发生了显著的运动方向变化(顺时针旋转), 并在42Ma±达到最大偏离方向, 即 $N40^\circ E$ 。这一时期正是印度板块与欧亚板块全面正向碰撞的时期, 大规模收缩作用发生, 出现了区域性逆冲断层与推覆构造。与此同时, 三江地区的主要地块沿着两条重要边界断裂, 即红河-哀牢山断裂与实皆断裂向东逃逸(图5a)。沿着边界断裂的深部层次发育了高温糜棱岩组合, 它们后期随着变质核杂岩的下盘一起抬升, 并于15Ma前后相继剥露到近地表。

而印度板块运动方向的转变和同时发生的扬子板块相对南向移动, 导致藏东地区岩石圈地块的大角度快速旋转(甚至可以达到 90° , 图1)和侧向碰撞带的出现, 以及沿着侧向碰撞带西缘的快速斜向俯冲过程(Bertrand and Rangin, 2003)。旋转后的印度板块受到各种作用的影响(可能包括了印度板块的运动惯性), 在36~37Ma逐渐发生逆时针旋转, 到23Ma±时期达到约NE方向。与此同时出现了递进收缩变形过程(多阶段逆冲断层的叠加)和区域性具有后碰撞弧特点的早期岩浆活动性。

发生在20~22Ma时期印度板块的快速顺时针旋转是岩石圈板块相互作用的重要转换时期, 此间发生了印度板块由前期逆时针旋转向顺时针旋转的转变(图4b, 图5b)。同时伴随着藏东三江地区(或东南亚地区)斜向俯冲的印度板块的回退效应(roll-back)。反向旋转板块对于藏东三江地块的拖曳与斜向俯冲板块回退作用的综合效应, 导致了在红河-哀牢山断裂与实皆断裂之间的扇形地域内发生区域性的伸展过程。绝大部分情况下, 伸展构造的发生具有继承性, 即沿着先前发育的实皆、哀牢山、澜沧江等收缩性和走滑断裂构造部位等发育。点苍山、哀牢山等下地壳深变质岩的剥露、变质核杂岩的发育和微弱的钙碱性岩浆活动性是此间发育的主要地质作用过程。值得注意的是, 一方面区域伸展作用使得深部地壳岩石(即变质核杂岩的下盘)与深部就位的碱性岩浆岩同时剥露于地表; 另一方面, 此时期恰恰对应于碱性岩浆活动性的间歇阶段(图4), 代之以变质核杂岩剥露和钙碱性岩浆活动。

持续的旋转与回退, 促使上覆岩石圈板块(即藏东三江

及邻区岩石圈板块)受到强烈的伸展,导致地堑与半地堑伸展构造体系的发育,并诱发了亏损地幔减压熔融产生的板内高钾岩浆岩的就位。

4 结论

从三江地区的构造分析出发,结合对岩浆活动性与岩石圈板块以及区域地块演化的讨论,本文得出以下结论:

(1)藏东三江造山带是一个复杂的新生代造山带,受印度与欧亚板块的碰撞与后碰撞效应的影响,在新生代形成了三种不同类型的构造型式,包括了区域和局部规模的逆冲断层与推覆构造、深部与浅部地壳层次走滑断裂构造以及变质核杂岩和地堑、半地堑等伸展构造。

(2)区域构造活动具有阶段性发展的特点,并与区域岩浆活动的阶段性发展相对应。区域性递进收缩事件伴随着早期具有岩石圈板块俯冲性质的弧高钾岩浆活动,而后期的递进伸展事件诱发了板内伸展环境中的晚期高钾岩浆活动。二者之间的碱性岩浆活动间歇期,对应着区域构造体制的转变与区域伸展作用的发生,变质核杂岩的发育与微弱的钙碱性岩浆活动是其最直接的表现。

(3)印度-欧亚板块之间的板块相互作用、区域板块与地块的旋转以及由此所致的不同构造环境制约着各种地质事件的发生与发展。北向运动的印度板块具有摆动式旋转特点,致使三江地块在新生代演化中发生了两次规模不等、特点不一的旋转过程,即早期的大角度快速旋转和晚期的小角度慢速旋转事件。两次地块旋转事件的发生,解释了藏东区域性收缩、走滑和伸展过程。

References

- Anne Socquet and Manuel Pubellier . 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 : 495 - 515
- Barr SM, MacDonald AS, Miller BV, Reynolds PH, Rhodes BP and Yokart B . 2002. New U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Doi Inthanon and Doi Suthep metamorphic core complexes, northwestern Thailand. In: *Proceedings, Symposium on Geology of Thailand, Bangkok, Thailand*, 284 - 294.
- Bertrand G and Rangin C . 2003. Tectonics of the western margin of the Shan plateau (central Myanmar): Implication for the India Indochina oblique convergence since the Oligocene. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21 : 1139 - 1157
- Burchfiel BC and Wang Erchie . 2003. Northwest-trending middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance. *Journal of Structural Geology*, 25 (5) : 781 - 792
- Chen HH, Dobson J, Heller F and Hao J . 1995. Paleomagnetic evidence for clockwise rotation of the Simao region since the Cretaceous; a consequence of India-Asia collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 134 (1 - 2) : 203 - 217
- Chung SL, Lo CH, Lee TY, et al. . 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting from 40 Myr age. *Nature*, 394 (6695) : 769 - 773
- Coleman M and Hodges K . 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374 (6517) : 49 - 52
- Dewey JF . 1988. Extensional collapse of orogens. *Tectonics*, 7 : 1123 - 1139
- Dong FL, Mo XX, Hou ZQ, Wang Y, Bi XM and Zhou S . 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Himalayan alkaline rocks in Lanping basin, Yunnan Province, and their geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24 (2) : 103 - 109 (in Chinese with English abstract)
- Duan JZ . 1999. Characteristics of the Cenozoic strike-slip (transform) convergent structure in the Three River area of West Yunnan. *Yunnan Geology*, 18 (2) : 99 - 110 (in Chinese with English abstract)
- 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
- Feng QL, Chongpan Chonglakmani, Dietrich Helmcke, Rucha Ingavat-Helmcke and Liu BP . 2005. Correlation of Triassic stratigraphy between the Simao and Lanpang-Phrae Basins: implications for the tectono-paleogeography of Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 : 777 - 785
- Funahara S, Nishiwaki N, Miki M, Murata F, Otofujii Y and Wang YZ . 1992. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from the Yangtze Block, central Yunnan, China: Implications for the India-Asia collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 113 (1 - 2) : 77 - 91
- Funahara S, Nishiwaki N, Murata F, Otofujii Y and Wang YZ . 1993. Clockwise rotation of the Red River fault inferred from paleomagnetic study of Cretaceous rocks in the Shan-Thai-Malay block of western Yunnan, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 117 : 29 - 42
- Funahara S, Nishiwaki N, Murata F, Otofujii Y and Wang YZ . 1993. Clockwise rotation of the Red River Fault inferred from paleomagnetic study of Cretaceous rocks in the Shan-Thai-Malay Block of western Yunnan, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 117 (1 - 2) : 29 - 42
- Guo SM, Zhang J, Li XG, Xiang HF, Chan TN and Zhang GW . 1986. Fault displacement and recurrence intervals of earthquakes on the northern segment of the Honghe River fault zone, Yunnan province. *Seismology and Geology*, 8 : 77 - 90
- 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 . 1997. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam. In: Harrison TM and An Yin (eds.), *The Tectonics of Asia*. Cambridge Univ. Press, New York, NY, 208 - 226
- Huang K and Opdyke ND . 1993. Paleomagnetic results from Cretaceous and Jurassic rocks of South and Southwest Yunnan: Evidence for large clockwise rotations in the Indochina and Shan-Thai-Malay terranes. *Earth and Planetary Science Letters*, 117 (3 - 4) : 507 - 524
- Ji JQ, Zhong DL and Zhang LS . 2000. Kinematics and dating of Cenozoic strike-slip faults in the Tengchong area, West Yunnan: Implications for the block movement in the southeastern Tibet plateau. *Chinese Journal of Geology*, 35 (3) : 336 - 349 (in Chinese with English abstract)
- Johnson MRW . 2002. Shortening budgets and the role of continental subduction during the India-Asia collision. *Earth-Science Reviews*, 59 (1 - 4) : 101 - 123
- Jolivet L, Maluski H, Beyssac O, Goff B, Avigad D, Lepvier C, Thang TT and Vuong NV . 1999. Oligocene-Miocene Bu Khang extensional gneiss dome in Vietnam: Geodynamic implications. *Geology*, 27 : 67 - 70
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, et al. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: Fission tract constraints. *Tectonophysics*, 343 : 111 - 134

- Khan MA, Treloar PJ, Searle MP and Jan MQ (eds). 2000. Tectonics of the Nanga Parbat Syntaxis and the Western Himalaya. Geological Society Special Publication, London, 170, 485
- Lee TY and Lawver LA. 1994. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region. *Tectonophysics*, 235(1-2): 149-180
- Lee TY, and Lawver LA. 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 251: 85-138
- 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*, 66: 1083-6732
- Leloup PH, Harrison TM, Ryerson FJ, Chen WJ, Li Q, Tapponnier 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*, 98: 6715-6743
- Leloup PH, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong DL, Liu XH, Zhang LS and Ji SC. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China): Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3-84
- Li GX. 1994. A preliminary study of some thrust-nappe structures in Lanping basin. *Yunnan Geology*, 13(2): 203-215 (in Chinese with English abstract)
- Liu BP, Feng QL, Chonglakmani C and Helmcke D. 2002. Framework of paleotethyan archipelago ocean of Western Yunnan and its elongation towards north and south. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 161-171 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Wang AJ, Cao DH and Xiu QY. 2004. Structure and evolution of the post-collisional fault structures in the Three River orogenic belt: exemplified by the Cenozoic Jianchuan-Lanping Basin. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 488-499 (in Chinese with English abstract)
- Liu YY and Morinaga H. 1999. Cretaceous paleomagnetic results from Hainan Island in South China supporting the extrusion model of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 301(1-2): 133-144
- Maheo G, Guillot G, Blichert-Toft J, Rolland Y and Pecher A. 2002. A slab breakoff model for the Neogene thermal evolution of South Karakorum and South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(1-2): 45-58
- Maluski H, Claude Lepvrier L, Jolivet A, Carter D, Roques O, Beyssac Ta Tang Tang, Duc Thang Nguyen and Avigad D. 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(1-2): 233-248
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of continental collision. *Science*, 189: 419-426
- Morley CK. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 347: 189-215
- Morley C K. 2001. Combined escape tectonics and subduction rollback back arc extension: A model for the evolution of Tertiary rift basins in Thailand, Malaysia and Laos. *Journal of the Geological Society*, 158: 461-474
- Ngoc Nam Tran, Mitsuhiro Toriumi and Tetsumaru Itaya. 1998. *P-T-t* paths and post-metamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 290: 299-318
- Otofuji, Y, Liu Y, Yokoyama, M, Tamai, M and Yin J. 1998. Tectonic deformation of the southwestern part of the Yangtze craton inferred from paleomagnetism. *Earth and Planetary Science Letters*, 156: 47-60
- Sato K, Liu YY, Zhu ZC, Yang ZY and Otofuji Y. 1999. Paleomagnetic study of Middle Cretaceous rocks from Yunlong, western Yunnan, China: Evidence of southward displacement of Indochina. *Earth and Planetary Science Letters*, 165(1): 1-15
- Sato K, Liu YY, Zhu ZC, Yang ZY and Otofuji Y. 2001. Tertiary paleomagnetic data from northwestern Yunnan, China; further evidence for large clockwise rotation of the Indochina block and its tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1-2): 185-198
- 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: 379-397
- Searle MP. 1995. The rise and fall of Tibet. *Nature*, 347: 17-18
- Sha SL, Yin ZY, Xia BB. 2004. The Cenozoic thrusting-nappe in northwest Yunnan. *Yunnan Geology*, 23(2): 154-163 (in Chinese with English abstract)
- Sobel ER and Dumitru TA. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3): 5043-5063
- Sun Z, Zhong ZH, Zhou D, Qiu XL and Wu SM. 2003. Deformation mechanism of Red River fault zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai basin formation. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(2): 1-9 (in Chinese with English abstract)
- Tao XF, Zhu LD, Liu DZ, Wang GZ and Li YG. 2002. The formation and evolution of the Lanping basin in Western Yunnan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 29(5): 521-525 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P and Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264: 319-324
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Schärer U, Zhong DL, Liu XH, Ji SC and Zhang LS, Zhong JY. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431-437
- Tapponnier P, Peltzer G and Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward MP and Ries A C (eds.), *Collision Tectonics*. 1986. Geological Society of London Special Publication, 19: 115-157
- Teng JW, Zhang ZJ, Zhang BM and Zhang H. 1997. Environmental change and the uplift of Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers*, 4(1-2): 247-254 (in Chinese with English abstract)
- Tran Ngoc Nam, Mitsuhiro T and Tetsumaru I. 2001. *P-T-t* paths and post-metamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 290: 299-318
- Thompson AB, Schulmann K, Jezek J and Tolar V. 2001. Thermally softened continental extensional zones (arcs and rifts) as precursors to thickened orogenic belts. *Tectonophysics*, 332(1-2): 115-141
- Turner S, Hawkesworth C, Liu JQ, et al. 1993. Timing of Tibet uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364(6432): 50-54
- Vernon RH. 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. *Electronic Geosciences* 5, 2
- Wan Y, Han TD, Zhu J, Ding D and Li X. 2003. A study on geomorphological development and Quaternary paleo-glaciation of the Diancangshan-Luopinshan mountain in western Yunnan. *Tropical Geography*, 23: 304-308
- Wang EQ, and Burchfiel BC. 1997. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the Eastern Himalayan syntaxis. *International Geology Review*, 39(3): 191-219
- Wang JH, Yin A, Harrison TM, Grove M, Zhang YQ and Xie GH. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth Planet Science Letters*, 188: 123-133
- Wang JH, Yin A, Harrison TM, Grove M, Zhou JY, Zhang YQ and Xie GH. 2001. Thermochronological constraints on the timing of Cenozoic high-potassic magmatism in eastern Tibet. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 20(4): 231-233 (in Chinese with English abstract)
- Wang JH, Zhou JY, Zhang YQ, Xie GH, Yin A, Harrison TM and Grove M. 2003. Thermochronological constraints on two pulses of Cenozoic high-K magmatism in eastern Tibet. *Science in China (Ser. D)*, 32(7): 52-537 (in Chinese)
- Wang J, Li JP and Wang JH. 2003. Shoshonitic magmatism in Dali-Jianchuan area, western Yunnan: a geochemical study of arc magmatism in a post-collisional strike-slip extensional setting. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 61-70 (in Chinese with English abstract)

- Wang PL, Lan CY, Yem NT, Lo CH, Lee TY and Chung SL. 1998. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan Red River shear zone: A perspective from Vietnam. *Geology*, 26: 887–890
- Wang SF and Wang EQ. 2005. Tectonic Origin of Klippen at the Foot of the Wuliangshan Thrust Belt, Western Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 317–322 (in Chinese with English abstract)
- Wang YZ, Li XL and Duan LL. 2000. Tectonism and metallogenesis in Southern Three-River region. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wu GY. 1994. Tertiary thrusting-nappe structures in northwest Yunnan, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 24: 495–515 (in Chinese with English abstract)
- Xia P and Xu YG. 2005. Domains and enrichment mechanism of the lithospheric mantle in western Yunnan: A comparative study on two types of Cenozoic ultrapotassic rocks. *Science in China (Ser. D)*, 34(12): 1118–1128 (in Chinese)
- Zhang LS and Zhong DL. 1996. The Red River strike-slip shear zone and Cenozoic tectonics of East Asia continent. *Chinese Journal of Geology*, 31: 327–341 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XC. 2003. Yuanmou metamorphic core complex and its ore controlling role. *Yunnan Geology*, 22: 107–115 (in Chinese)
- Zhao X, Yu XH, Mo XX, Zhang J and Lü BX. 2004. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic alkali-rich porphyries and xenoliths hosted in Western Yunnan province. *Geoscience*, 18(2): 217–228
- Zhong DL, et al. (eds.). 1994. *Paleotectonics in western Yunnan and Sichuan, China*. Beijing: Science Press, 248 (in Chinese)
- Zhong DL, Tapponnier, Wu HW, Zhang LS, Ji SC, Zhong JY, Liu XH, Schaerer U, Lacassin R and Leloup P. 1989. Large scale strike-slip fault: The major structure of intracontinental deformation after collision. *Chinese Science Bulletin*, (7): 526–529 (in Chinese)
- Zhong DL, Wang Y and Ding L. 1991. The Tertiary Gaoligong intracontinental strike-slip fault and its associated extensional structure in western Yunnan, China. In: Zhang X (eds). *Annual report 1989–1990 Lab. Lithos. Tecton. Evolution. Inst. Geol., Academia Sinica, Beijing*, 18–22. (in Chinese)
- Zhou HW, Murphy MA and Lin QL. 2002. Tomographic imaging of the Tibet and surrounding region: evidence for wholesale under thrusting of Indian slab beneath the Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 285–292 (in Chinese with English abstract)
- 董方浏, 莫宣学, 侯增谦, 王勇, 毕先梅, 周肃. 2005. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 103–109
- 段建中. 1999. 滇西三江地区新生代走滑(转换)会聚构造特征. *云南地质*, 18(2): 99–110
- 季建清, 钟大赉. 张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学、及对青藏高原东南部块体运动的意义. *地质科学*, 35(3): 336–349
- 李光勋. 1994. 兰坪盆地某些逆冲推覆构造研究. *云南地质*, 13(2): 203–215
- 刘本培, 冯庆来, Chonglakmani C, Helmcke D. 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸. *地学前缘*, 9(3): 161–171
- 刘俊来, 王安建, 曹殿华, 修群业. 2004. 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. *高校地质学报*, 12(4): 488–499
- 沙绍礼, 殷质豫, 夏抱本. 2004. 滇西北新生代逆冲推覆构造. *云南地质*, 23(2): 154–163
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 丘学林, 吴世敏. 2003. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据. *热带海洋*, 22(2): 1–9
- 陶晓凤, 朱利东, 刘登忠, 王国芝, 李佑国. 2002. 滇西兰坪盆地的形成及演化. *成都理工学院学报(自然科学版)*, 29(5): 521–525
- 滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 张慧. 1997. 青藏高原的隆升与环境变化. *地学前缘*, 4(1–2): 247–254
- 王建, 李建平, 王江海. 2003. 滇西大理-剑川地区钾玄质岩浆作用: 后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究. *岩石学报*, 19(1): 61–70
- 王江海, 尹安, Harrison TM, Grove M, 周江羽, 张玉泉, 解广衰. 2001. 青藏高原新生代高钾岩浆活动的热年代学制约. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 231–233
- 王江海, 周江羽, 张玉泉, 解广衰, 尹安, Harrison TM, Grove M. 2002. 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)*, 32(7): 529–537
- 王世锋, 王二七. 2005. 滇西无量山逆冲推覆带山前飞来峰的构造成因. *地质学报*, 79(3): 317–322
- 王义昭, 李兴林, 段丽兰. 2000. 三江地区南段大地构造与成矿. 北京: 地质出版社
- 吴根耀. 1994. 滇西北地区第三纪的逆冲-推覆构造. 18(4): 331–338
- 夏萍和徐义刚. 2004. 滇西岩石圈地幔分区和富集机制: 新生代两类超钾质火山岩的对比研究. *中国科学(D辑)*, 34(12): 1118–1128
- 张晓常. 2003. 元谋变质核杂岩及其控矿作用. *云南地质*, 22: 107–115
- 赵欣, 喻学惠, 莫宣学, 张瑾, 吕伯西. 2004. 滇西新生代富碱斑岩及其深源包体的岩石学和地球化学特征. *现代地质*, 18(2): 217–228
- 张连生和钟大赉. 1996. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造. *地质科学*, 31: 327–341
- 钟大赉, Tapponnier P, 吴海威, 张连生, 嵇少丞, 钟嘉猷, 刘小汉, Schaerer U, Lacassin R, Leloup P. 1989. 大型走滑断层——碰撞后陆内变形的重要形式. *科学通报*, (7): 526–529
- 钟大赉等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社
- 钟大赉, 王毅, 丁林. 1991. 滇西高黎贡陆内第三纪走滑断裂及其伴生的拉张构造, 中国科学院地质研究所岩石圈开放实验室年报(1989–1990), 北京: 中国科学技术出版社, 18–22
- 周华伟, Murphy MA, 林清良. 2002. 西藏及其周围地区地壳、地幔地震层析成像——印度板块大规模俯冲于西藏高原之下的证据. *地学前缘*, 9(4): 285–292

附中文参考文献

- 董方浏, 莫宣学, 侯增谦, 王勇, 毕先梅, 周肃. 2005. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 103–109
- 段建中. 1999. 滇西三江地区新生代走滑(转换)会聚构造特征. *云南地质*, 18(2): 99–110
- 季建清, 钟大赉. 张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学、及对青藏高原东南部块体运动的意义. *地质科学*, 35(3): 336–349
- 李光勋. 1994. 兰坪盆地某些逆冲推覆构造研究. *云南地质*, 13(2): 203–215
- 刘本培, 冯庆来, Chonglakmani C, Helmcke D. 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸. *地学前缘*, 9(3): 161–171
- 刘俊来, 王安建, 曹殿华, 修群业. 2004. 三江造山带后碰撞断裂构造