

# 喜马拉雅造山带东、西构造结的地质特征与对比

郑来林<sup>1,2</sup>, 金振民<sup>2</sup>, 潘桂棠<sup>1</sup>, 孙志民<sup>1</sup>, 耿全如<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 四川成都 610082

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 喜马拉雅造山带的东、西两端分别有一个构造急剧转向的地区——构造结, 这里是探讨喜马拉雅造山带构造演化的重要场所。区域地质调查资料对比显示这2个构造结有: (1) 相似的地貌景观; (2) 相似的地质特征和演化历史, 即都缺失喜马拉雅沉积岩(寒武纪—第三纪); (3) 结晶岩系中都有高压变质岩, 且在10 Ma以来均发生过深熔与混合岩化作用; (4) 25 Ma以来, 特别是10 Ma以来两地都经历了快速剥露和隆升作用; (5) 印度板块—欧亚板块的碰撞时间接近, 分别为75 Ma和65 Ma, 均早于喜马拉雅造山带的其他地区。这些相似性表明: 伸展拆离和以河流作用为主的地表过程是喜马拉雅造山带的东、西构造结快速剥露的主导因素; 因强烈剥露减压所致的地壳部分熔融作用形成的岩浆向地表减压处的流动在构造结的演化过程中起着重要作用。

**关键词:** 地质特征; 构造结; 喜马拉雅造山带。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2004)03-0269-09

收稿日期: 2003-09-18

## A Geological Comparison between the Eastern and Western Himalayan Syntaxes

ZHENG Lai-lin<sup>1,2</sup>, JIN Zhen-min<sup>2</sup>, PAN Gui-tang<sup>1</sup>, SUN Zhi-min<sup>1</sup>, GENG Quan-ru<sup>1</sup>

1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** There are two syntaxes, where orogenic structures turn sharply. They occurred in the eastern and western ends of the Himalayan belt respectively, and are the ideal places to discuss the evolution of the belt. The comparison of geological data from the eastern and the western syntaxes shows that they have: (1) similar geography; (2) geological features and evolution (both lost the Himalayan sediments of Cambrian-Tertiary); (3) similar high-pressure metamorphic rocks which overprinted by the re-melting of crust and migmatization younger than 10 Ma; (4) similar rapid uplifting experience since 25 Ma, especially since 10 Ma; (5) similar ages of the collision between India and Eurasia (75 Ma and 65 Ma in eastern and western syntaxes respectively) and much earlier than other places within the belt. The similarities suggest that: (1) detachment and surface processes (especially river process) would be the main reasons resulted in rapid denudation; and (2) the melts derived from the partial melting rocks in middle to low crust due to the denudation flowed and focused would play important roles on the evolutions of the syntaxes.

**Key words:** geological feature; syntax; orogenic belt of Himalaya.

喜马拉雅山脉是印度板块和欧亚板块发生碰撞作用形成的全球最年轻、规模最大的造山带, 是研究板块构造和造山作用的理想场所。喜马拉雅造山带东、西两端分别有一个构造急剧转向的地区——构

造结。这里是整个喜马拉雅山脉中构造应力作用最强、隆升和剥露速率最快、新生代变质和深熔作用最强的地区, 是研究造山作用过程中地壳重造(变质变形和重熔)的野外实验室。由于这2个构造结地区具

有许多相似的地貌和地质特征, Burg and Podladchikov(1999)认为它们可能有着大体相似的成因和演化过程. 但是, 由于受自然条件和研究程度不对称的限制, 2 个构造结之间究竟有多少异同点仍是有待讨论的问题.

本文以 1 : 25 万墨脱县幅区域地质调查项目在东构造结地区所取得的第一手资料为基础, 结合文献资料, 对 2 个构造结地区的地质特征及构造演化进行对比和总结.

### 1 西构造结地质

西构造结从北到南由喀喇昆仑板块、喀喇昆仑缝合带(向西延入印度河—雅鲁藏布江缝合带)、库斯坦(Kohistan)—拉达克(Ladakh)岛弧、印度河—雅鲁藏布江缝合带和南迦帕尔巴特(Nanga Parbat)—哈拉木什(Haramosh)地块等构造单元组成(图 1).

喀喇昆仑板块由经历了复杂的同碰撞和碰撞后变质历史并被中生代和第三纪深成岩所侵入的沉积岩组成. 库斯坦—拉达克岛弧活动于早白垩世, 晚白垩世同欧亚板块相碰撞. 它是在主碰撞之前最后一个增生于欧亚板块上的岛弧块体. 同位素年代学研究表明库斯坦同喀喇昆仑板块的碰撞时代早于 76 Ma、晚于 102 Ma.

南迦帕尔巴特—哈拉木什地块的构造形态为北东走向的背形, 下部由夹有少量麻粒岩和角闪岩的层状英云闪长质片麻岩组成, 麻粒岩为钙硅酸盐岩; 中、上部由夹有少量钙硅酸盐岩和角闪岩的层状花岗质片麻岩组成. 泥质岩的特征矿物组合从北往南为蓝晶石+白云母, 夕线石+钾长石, 夕线石+钾长石+堇青石(Zeitler *et al.*, 1993), 即变质程度由北往南逐渐升高. 混合岩化较为强烈, 淡色花岗岩条带(厚 1~5 cm)丰富. 锆石的 U/Pb 同位素研究表明, 下部片麻岩的原岩年代为 1 850 Ma, 中上部原岩的年龄为 400~500 Ma. 中上部片麻岩的年龄和化学成分与巴基斯坦以及喜马拉雅其他地区中的 S 型花岗岩相类似, 并且被认为是这些 S 型花岗岩的变质产物. 根据角闪石的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄(16~25 Ma), 推测该地区的变质高峰(0.75 GPa, 580 °C)年龄为 30~25 Ma (Zeitler *et al.*, 1989). Chamberlain *et al.*(1991)对 Babusar 山口地区位于主地幔逆冲断层下盘的变质岩进行研究后认为, 临近主地幔逆冲断层变质高峰时间早于 40 Ma, 有些地区早于 50 Ma.

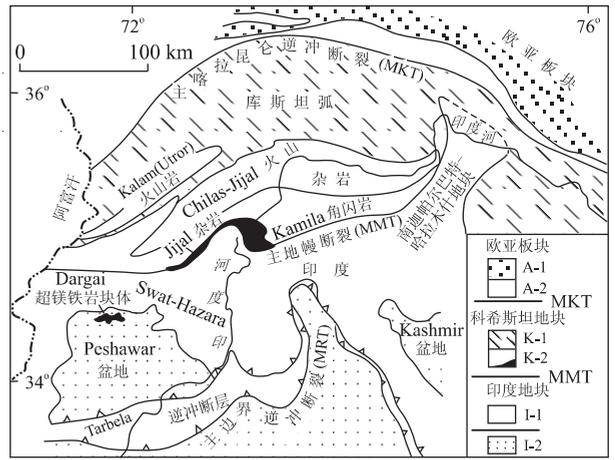


图 1 西构造结地区地质图

Fig.1 Geological map of the area of Nanga Parbat syntaxis

南迦帕尔巴特—哈拉木什块体的北界尚未确定(虚线). 欧亚板块: A-1. 喀喇昆仑基岩; A-2. 泥质岩和火山岩. 库斯坦: K-1. 白垩纪至第三纪变火山岩、侵入岩和变沉积岩; K-2. 无色部分为辉石和麻粒岩相变质岩、共生的火成岩; 黑色部分为 Jijal 超镁铁杂岩. 印度板块: I-1. 花岗岩、花岗片麻岩和变沉积岩; I-2. 第三纪和第四纪磨拉石沉积

自 Pognante and Spencer(1991)在南迦帕尔巴特西南方的 Kaghan 谷中首次发现榴辉岩以来, 其他学者又在西构造结的 Stak 地区和东拉达克的 Tso Morari 穹隆中找到了榴辉岩(Guillot *et al.*, 1995a; Guillot *et al.*, 1995b; Guillot *et al.*, 1997; Le Fort *et al.*, 1997; 金振民, 1999).

Kaghan 榴辉岩产于 HHC(高喜马拉雅结晶岩系)中, 矿物组合为绿辉石+石榴石+石英+金红石±多硅白云母, 高峰温压条件是(650±50)°C、1.3~1.8 GPa. O'Brien *et al.*(1998)又在绿辉石中发现了柯石英包裹体, 通过计算认为含柯石英的超高压榴辉岩的温压条件是 650 °C 和 2.6 GPa. 该榴辉石的 Sm-Nd 等时线年龄为(49±7) Ma(Tonarni *et al.*, 1993).

Le Fort *et al.*(1997)在位于南迦帕尔巴特—哈拉木什地块东侧 Stak 地区印度河缝合带中发现了由基性岩变质而成的榴辉岩, 其矿物组合为石榴石+绿辉石+角闪石+斜长石+石英+黑云母, 形成时的 p-T 条件分别为(1.3±0.1)GPa, (610±60)°C 和(1.0±0.1)GPa, (700±50)°C.

Tso Morari 穹隆位于印度境内东拉达克地区, 构造部位和形成机制类似藏南的康马穹隆, 其南边为弱变质的特提斯盖层, 北面为印度河缝合带. 榴辉

岩产于穹隆的边部,矿物组合为石榴石+绿辉石+石英+金红石,另外含少量的多硅白云母、绿帘石和角闪石,变质峰值  $p-T$  条件为  $(2.0 \pm 0.2)$  GPa 和  $(850 \pm 50)^\circ\text{C}$ , 其原岩可能是二叠纪的玄武岩(同 Panjal 拗陷中的火山岩相当)(Guillot *et al.*, 1995a; Guillot *et al.*, 1995b). Guillot *et al.* (1997) 在富铁的变沉积岩中发现了硬玉+硬绿泥石+多硅白云母+石榴石的榴辉岩相矿物组合,该组合所记录的温压条件是  $(550 \pm 50)^\circ\text{C}$  和  $(2.0 \pm 0.2)$  GPa.

由于西构造结中缺失高喜马拉雅沉积岩系和其他可以定年的地层,有关年代学的问题只能靠同位素地质年代学进行研究. Kaghan 榴辉岩的高峰变质年龄早于 49 Ma, 南迦帕尔巴特南边 Babuss 山口区域的印度板块麻粒岩的高峰变质时间早于 42 Ma, 因此,喜马拉雅西部的印度—欧亚碰撞时间只有早于上述年代,才能有充分的时间使地壳增厚形成榴辉石,以及加热到夕线石带变质温度. 喜马拉雅淡色花岗岩的 2 个锆石 U—Pb 年龄分别为 35 Ma (Swat) 和 50 Ma (Naran), 也都比中、东喜马拉雅中类似的淡色花岗岩的生成时代早 (Zeitler and Chamberlain, 1991). 这些都表明西构造结地区印度—欧亚碰撞很可能发生在 65 Ma (比变质年龄早 15 Ma), 同古地磁证据相吻合.

同时有许多证据表明南迦帕尔巴特地体的核部叠加了更新世—上新世 (1~11 Ma) 的高级变质和部分熔融作用. 蓝晶石—白云母带变质泥岩中独居石的 U—Pb 年龄为 11~4 Ma (Smith *et al.*, 1992). Zeitler 和 Chamberlain (1991) 报道了南迦帕尔巴特片麻岩中 3 处淡色花岗岩岩脉的锆石 U—Pb 年龄分别是 7, 5 和 2.3 Ma; 来自南迦帕尔巴特峰的角闪岩漂砾的角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为 2.8~1.5 Ma, 而黑云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为 2.4~1.0 Ma.

Zeitler *et al.* (1993) 认为, 新第三纪的快速剥露作用所产生的减压作用导致了淡色花岗岩岩浆的生成. 淡色花岗岩岩浆又将热量从地壳深部带到浅部, 从而诱发较低压的变质作用 ( $600^\circ\text{C}$ 、0.4 GPa). 南迦帕尔巴特地区新第三纪的快速侵蚀、隆升、变质和深熔作用是同时的, 地表的剥蚀作用是主导性的诱发因素.

由东向西, 从南迦帕尔巴特峰 (海拔 8 125 m) 和哈拉木什峰 (海拔 7 409 m) 中间穿过的印度河, 在与吉尔吉特河 (Gilgit) 汇合之前的海拔为 2 000~1 600 m, 山峰和深切峡谷 (印度河峡谷、阿斯特河峡

谷) 之间高差巨大. 印度河和阿斯特河 (Astor) 的搬运能力很强, 保证了剥蚀作用的顺利进行. Seeber and Gornitz (1983) 认为, 喜马拉雅山脉中的主要河流 (如印度河、雅鲁藏布—Brahmaputra、Sutlej 和 Arun) 都是出现在喜马拉雅隆起之前的先成河.

图 2 为南迦帕尔巴特西南的巴基斯坦喜马拉雅和南迦帕尔巴特地区的反映变质作用和深熔作用的温度—时间图. 从中可以看出南迦帕尔巴特地区的平均剥露速率为 0.83~1.12 mm/a, 即 25 Ma 以来, 19.3~28 km 的上覆物质被剥蚀. 根据  $p-T-t$  轨迹, Zeitler *et al.* (1989) 指出南迦帕尔巴特地区经历过一个连续的加速冷却过程, 从 20 Ma 的小于  $20^\circ\text{C}/\text{km}$  到 0.4 Ma 至今的  $300^\circ\text{C}/\text{km}$ . 南迦帕尔巴特地区核部岩石的岩石学、地质温压计、地质年代学资料表明, 其 10 Ma 以来的剥露速率平均为  $(4.5 \pm 1.1)$  mm/a, 1 Ma 以来至少有 14 km 的物质被剥蚀掉.

Tahirkheli and Jan (1979) 认为围限南迦帕尔巴特地块的 3 条边界断层是主地幔逆冲断层 (MMT). Madin (1986) 将西界断层称作 Raikhot 断层并且认为它是一个左行逆断层. Butler and Prior (1988) 认为 Raikhot 断层是一条产状很陡、东向倾的逆断层, 南迦帕尔巴特片麻岩沿该断层逆冲到第四纪的印度河砾石之上. Chamberlain *et al.* (1988) 对该断层两侧的变质岩进行了  $p-T-t$  轨迹研究后认为, 库斯坦岛弧非常明显地逆冲到了南迦帕尔巴特片麻岩之上. 其过程很有意思, 大约 30 Ma 时埋藏深达 35 km

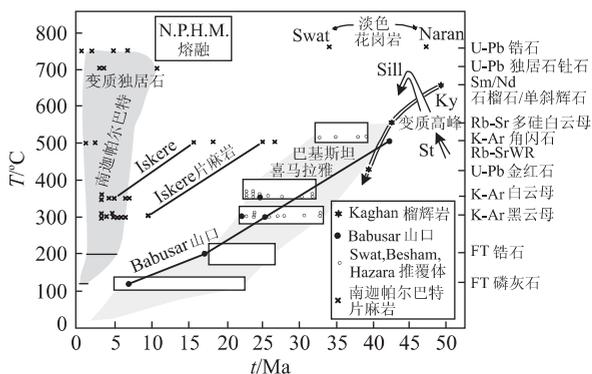


图 2 南迦帕尔巴特西南部巴基斯坦喜马拉雅地区和西构造结南迦帕尔巴特片麻岩的温度—时间关系 (据 Searle, 1996).

Fig. 2 Temperature-time plot for the Pakistan Himalaya to the southwest of Nanga Parbat and the Nanga Parbat gneisses that form the western syntaxis of the Himalaya

的库斯坦岛弧中的麻粒岩逆冲到了埋藏深约 14 km 的南迦帕尔巴特片麻岩之上,逆冲作用和热量的传递使两者的  $p$ 、 $T$  趋于一致,两者的埋藏深度均为 28 km,在 25~10 Ma 这段时间内两者以相同速度 (0.5 km/Ma) 隆升,然而在最后的 10 Ma 以来,南迦帕尔巴特的隆升速度比相邻的库斯坦快。

根据以上研究我们可以得出这样的结论:地表显示南迦帕尔巴特变质岩系覆盖在库斯坦岛弧之上。Raikhot 断层是一个高角度断层,它极可能是一个凹面向下的弧状断层。Chamberlain *et al.* (1989) 的研究表明早期 (30 Ma 之前) 南迦帕尔巴特地体沿该断层向下俯冲,25~10 Ma 这段时间内断层停止活动,10 Ma 以来该断层复活,但构造性质却发生了转变。

拉达克 (Ladakh) 同南迦帕尔巴特之间的边界断层性质,目前还没有具体的资料,但扎斯卡 (Zanskar) 正断层带 (藏南折离系) 有汇入该边界的趋势 (图 1)。

## 2 东构造结地质

东构造结从北往南由冈底斯—拉萨陆块、雅鲁藏布江缝合带和印度陆块组成 (图 3)。

冈底斯—拉萨陆块以嘉黎—迫龙藏布断裂带为界可划分为,北部的念青唐古拉—腾冲燕山晚期火山—岩浆弧和南部的冈底斯—下察隅晚燕山—喜马拉雅期火山—岩浆弧。嘉黎—迫龙藏布断裂带为一条以韧性剪切带和残留蛇绿混杂岩为标志的弧—弧碰撞带 (郑来林等, 2003)。

雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带呈向 NE 凸的倒“U”字型,连续出露在南迦巴瓦岩群和冈底斯陆缘弧之间。它主要由强糜棱岩化的变超镁铁质岩、变镁铁质岩、石英岩和白云母石英片岩组成,夹有大理岩岩块,块体之间以韧性剪切带接触。根据蛇绿混杂岩中角闪石—斜长石温压计估算的变质高峰条件为 525 °C、 $0.75 \times 10^5$  kPa,石英片岩中的白云母为形成于高压低温环境下的多硅白云母 (张旗和李绍华, 1981)。在雅鲁藏布江西岸的鲁霞蛇绿混杂岩中测得角闪石的 K—Ar 法年龄为  $(218.63 \pm 3.36)$  Ma (章振根等, 1992),笔者从出露于旁辛的变橄榄辉岩中,用 Ar/Ar 法测得辉石全熔年龄为  $(200 \pm 4)$  Ma,推测研究区雅鲁藏布江洋的形成时代应早于晚三叠世,因为大洋中洋壳的年龄可以有亿年以上的跨度,

而最老的洋壳不一定能在蛇绿混杂岩保存下来。

缝合带的边界断层是产状较陡 ( $60^\circ \sim 85^\circ$ )、倾向南迦巴瓦外侧的韧性剪切带。带内褶皱和拉伸线理非常发育,指向构造表明,主期变形性质为顶部向南迦巴瓦四周伸展的剪切作用,早期为挤压兼走滑。伸展拆离作用的时间早于 16 Ma,为 23 Ma (Ding *et al.*, 2001; 张进江等, 2003)。边界韧性剪切带经常被以南迦巴瓦峰为中心的放射状高倾角脆性断层所截切 (图 3)。

东构造结缺失特提斯喜马拉雅沉积岩系,这里的高喜马拉雅结晶岩被称做南迦巴瓦岩群。它由相互之间以韧性剪切带接触的直白岩组、派乡岩组和多雄拉混合岩组成。

直白岩组由一套含高压麻粒岩透镜体为特征的片麻岩、麻粒岩组成。透镜状高压麻粒岩为石榴石单斜辉石岩和石榴蓝晶二长麻粒岩。根据矿物反应关系和岩相学特征,高压麻粒岩中有早、中、晚 3 期变质矿物组合。在石榴蓝晶二长麻粒岩中,第一期 (M1) 为多硅白云母+黑云母+斜长石+石英,包裹在蓝晶石、石榴石变斑晶中;第二期 (M2) 为石榴石+蓝晶石+三元长石+金红石+石英±石墨;第三期 (M3) 为石榴石+夕线石+斜长石+黑云母+堇青石+尖晶石,其中黑云母+堇青石+尖晶石或黑云母+钠长石+尖晶石呈后成合晶环石榴石分布,夕线石具蓝晶石的假象,有些夕线石具有钠长石+尖晶石、堇青石+尖晶石的后成合晶,表明 M3 组合是 M2 组合经快速减压作用的产物。笔者用石榴石—黑云母温压计计算矿物组合 (M1) 形成的温压条件为 642~693 °C 和 0.8~0.94 GPa,与 600 °C 和 0.91 GPa 的计算结果 (王天武和马瑞, 1996) 相比温度略高;峰期矿物组合 (M2) 形成的温压条件为 870~890 °C 和 1.7~1.8 GPa (刘焰和钟大贵, 1998); M3 组合形成的温压条件为 800 °C ± 和 0.5 GPa ± (Liu and Zhong, 1997)。同样,石榴石单斜辉石岩也有早、中、晚 3 期变质矿物组合。第一期变质矿物石英包裹在石榴石和透辉石中;第二期变质矿物组合 (M2) 为石榴石+透辉石+石英+榍石±方柱石,石榴石常被钙长石+角闪石、钙长石+辉石后成合晶环绕、替代形成白眼圈;透辉石常退变为角闪石,在许多榴闪岩透镜体的核部常可见到石榴石单斜辉石岩残留体,表明一些榴闪岩是石榴石单斜辉石岩的退变产物;第三期变质矿物组合 (M3) 为斜长石+角闪石+辉石+石英,是 M2 组合经快

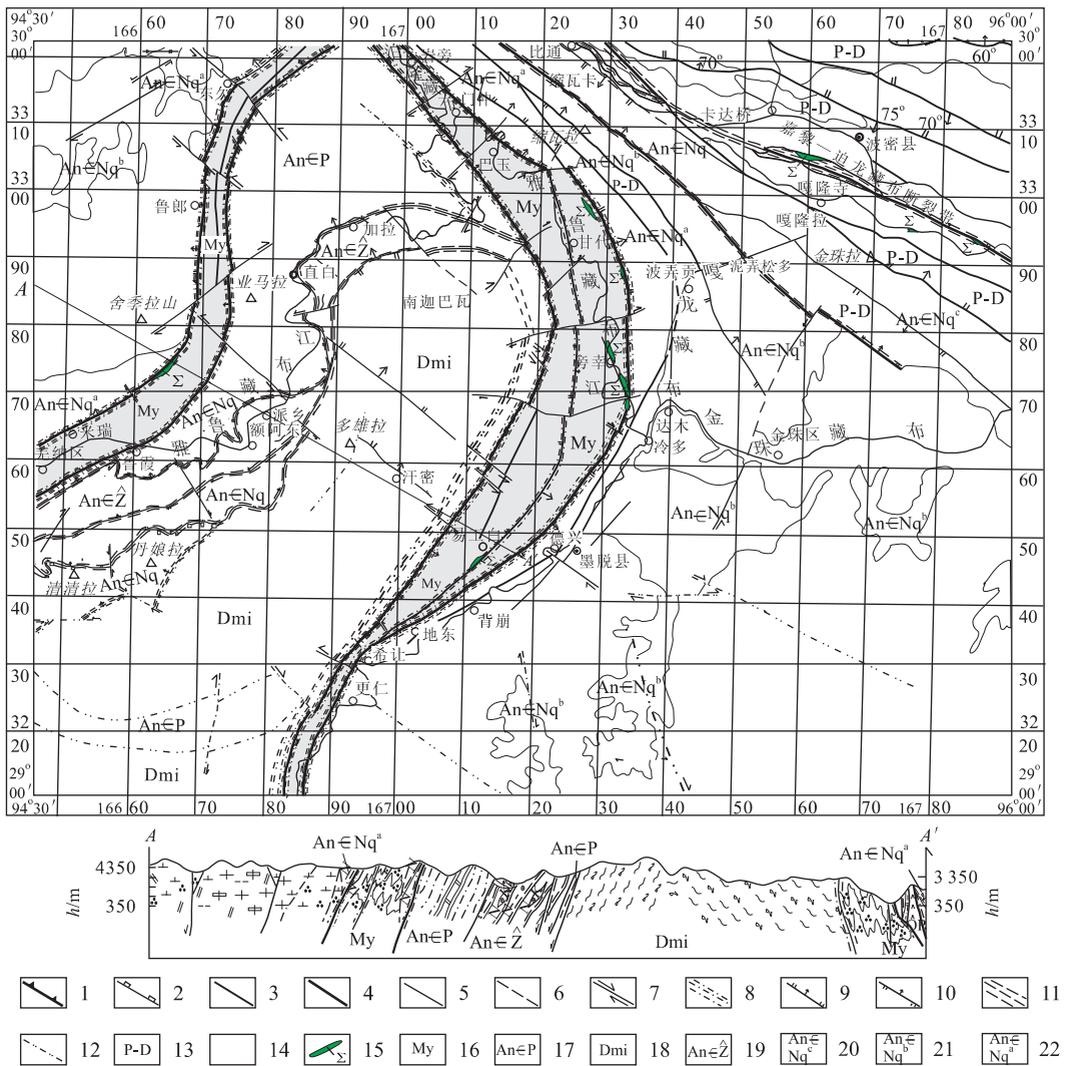


图 3 南迦巴瓦地区地质简图

Fig. 3 Geological sketch map of Nanjiabawa (Namche Barwa)

1. 板块俯冲带; 2. 板块结合带; 3. 区域性大断层; 4. 隐伏断层; 5. 实测性质不明断层; 6. 推测性质不明断层; 7. 走滑断层; 8. 强韧性剪切带; 9. 正断层; 10. 逆断层; 11. 韧性剪切带; 12. 解译断层; 13. 石炭-泥盆系; 14. 侵入岩; 15. 超基性岩; 16. 结合带; 17, 18, 19. 南迦巴瓦岩群迦派乡岩组、迦多雄拉混合岩、迦直白岩组; 20, 21, 22. 念青唐古拉岩群 a 岩段、b 岩段、c 岩段

速减压作用的产物。M2 组合形成的温压条件为  $t > 875\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1.0\text{ GPa} < p < 2.0\text{ GPa}$ ; M3 组合形成的温压条件为  $(850 \pm 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $(0.5 \pm 0.1)\text{ GPa}$ 。由于 2 种高压麻粒岩在空间和成因上都存在着密切联系, 因此早期变质作用的温压条件为  $(650 \pm 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $(0.85 \pm 0.05)\text{ GPa}$ , 峰期变质作用的温压条件为  $870 \sim 890\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1.7 \sim 1.8\text{ GPa}$ , 退变质作用的温压条件是  $(850 \pm 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $(0.5 \pm 0.1)\text{ GPa}$ 。

高压麻粒岩透镜体的围岩主要为麻粒岩相的富铝片麻岩, 有时为大理岩。富铝片麻岩常见的矿物组合为: 夕线石+石榴石+钾长石+棕红色黑云母+石英+石墨, 夕线石常有堇青石+尖晶石的后成合

晶; 夕线石+石榴石+钾长石+斜长石+棕红色黑云母+石英+斜方辉石+石墨, 夕线石常退变为堇青石。大理岩中常见的矿物组合为, 方解石+透辉石+金云母+石英, 方解石+透辉石+金云母+石英+斜长石+方柱石+石墨, 方解石+透辉石+金云母+橄榄石。这些矿物组合与高压麻粒岩中的 M3 组合相同, 属中压相系麻粒岩相, 表明他们为同一期变质作用的产物。笔者通过锆石测年获得直白岩组的原岩年龄介于  $1312 \sim 582\text{ Ma}$  之间。

派乡岩组为一套富含大理岩的变粒岩、片麻岩组合, 构造层次上位于直白岩组之上, 以一系列的尖棱和相似褶皱变形为主, 韧性剪切带及其附近塑性

变形发育。典型岩石类型为黑云变粒岩、黑云片岩、黑云斜长片麻岩、大理岩、钙硅酸盐岩和石英岩等，常见代表性矿物组合为十字石+斜长石( $An_{30-50}$ ) + 角闪石 + 黑云母 + 白云母 + 石英 + 蓝晶石，黑云母 + 夕线石 + 石榴石 + 钾长石 + 石英，角闪石 + 斜长石( $An_{30-50}$ ) + 石榴石 + 透辉石 + 石英，方解石 + 透辉石 + 金云母 + 方柱石 + 石英，白云石 + 方解石 + 透辉石 + 金云母，石榴石 + 透辉石 + 绿帘石，石榴石 + 透辉石 + 斜长石。这些矿物组合基本属于中压相系角闪岩相。

派乡岩组中没有高压麻粒岩相残留体，变质程度由高角闪岩相向上(NW)过渡为低角闪岩相，上、下界限均为韧性剪切带，表明派乡岩组可能没有经历过高压变质作用，同直白岩组之间有大量的地层缺失。

多雄拉混合岩主要由条带状混合岩、眼球状混合岩、肠状混合岩和条带状混合片麻岩组成，高温流变褶皱发育且多为片麻理或片理褶皱，褶皱样式复杂多变。通过野外填图发现多雄拉混合岩处于南迦巴瓦变质—熔融穹隆构造的核部。

多雄拉混合岩中以条带状混合岩和眼球状混合岩分布最广。长英质脉体的宽度多为 0.5~5.0 cm，但延伸长达数米至数十米，常见矿物组合为正长石 + 石英 + 钠长石 + 黑云母 + 毛发状夕线石 + 石榴石。基体通常为暗色条带或团块，偶尔也有富铝片麻岩条带。暗色基体的岩石类型为黑云斜长角闪岩，常见矿物组合为中更长石 + 普通角闪石 + 黑云母 + 石英 + 石榴石 + 单斜辉石；富铝片麻岩条带的常见矿物组合为夕线石 + 正长石 + 石英 + 石榴石 + 斜长石。

在多雄拉混合岩中也有一些透镜状钙硅酸盐岩残留体产出，其主要岩石类型有方柱透辉岩、透辉斜长变粒岩、透闪透辉石榴石岩、石榴黑云斜长角闪岩、绿黝帘石石榴石透辉岩和绿黝帘石方柱石石榴石透辉岩等，其中以在苯普巴一带产出的米级榴闪岩化石榴石单斜辉石高压麻粒岩透镜体的规模最大。根据残留体中矿物的共生和反应关系，可以确认其中一些为石榴石单斜辉石岩的退变产物，这些石榴石单斜辉石岩和直白岩组中石榴石单斜辉石高压麻粒岩完全相同。因此，多雄拉混合岩是直白岩组经过混合岩化和重熔作用改造的产物。没有发现蓝晶石石榴石高压麻粒岩残留体的原因，可能是它们已转变为夕线石 + 正长石 + 石英 + 石榴石 + 斜长石集合体或完全重熔，也可能是工作程度还不够。

根据南迦巴瓦岩群中高压麻粒岩的形成时代 69~45 Ma 和雅鲁藏布江蛇绿混杂岩的变质年龄 ( $60.66 \pm 0.33$ ) Ma (张进江等, 2003)，东构造结印度板块—欧亚板块碰撞时间早于 70 Ma (丁林和钟大赉, 1999)。

高压麻粒岩中普遍存在的快速减压退变质作用年龄为 23~18 Ma (丁林和钟大赉, 1999)，与蛇绿混杂带中常见的伸展拆离作用同步 (16~23 Ma) (Ding *et al.*, 2001; 张进江等, 2003)。可见，伸展拆离作用是高压麻粒岩快速减压的重要机制。

以多雄拉混合岩为代表的混合岩岩化和深熔作用的发生时间和形成时的埋藏深度分别大约为 5 Ma 和 18 km (Burg *et al.*, 1998)。小规模幔源岩浆岩的侵位时间和形成深度分别大约为 7~6 Ma 和 10~14 km (张进江等, 2003)。由此可见，上新世以来南迦巴瓦地区经历了快速剥蚀作用，5 Ma 以来的平均剥蚀速率高达 3.6 mm/a。该平均剥蚀速率与西构造结中同时期的平均剥蚀速率 ( $4.5 \pm 1.1$ ) mm/a (郑来林等, 2001) 基本相当。

东构造结地区的雅鲁藏布江大峡谷是世界上最长、最深的峡谷。雅鲁藏布江从平距只有 22 km 的南迦巴瓦峰 (海拔 7 782 m) 和比鲁 (海拔 7 294 m) 之间穿过，峡谷入口处江面海拔约 2 850 m，出口处江面海拔约 600 m，河流的侵蚀、搬运能力极强。只有当剥蚀下来的物质被不断地搬运走，进一步的剥蚀作用才会继续进行。

### 3 东、西构造结的对比

#### 3.1 主要相似之处

3.1.1 地貌特征相似 两者都有著名的大江、大河从海拔高达 7 000 多 m 的山峰之间穿过，构成深切峡谷地貌。两地的年降雨量大，持续时间长，泥石流、滑坡、冰川和雪崩等地质作用非常活跃。这 2 个地区是整个喜马拉雅造山带中地表剥蚀作用最强、单位面积河流长度最大、搬运能力也最强的地区。

3.1.2 缝合带和边界断层 印度—雅鲁藏布江缝合带和主地幔断裂在东西构造结地区都呈向 NE 凸的倒“U”字型。南迦帕尔巴特—哈拉木什高喜马拉雅结晶岩系的两侧及北部蛇绿岩出露较少，主地幔断层的活动性质早期为逆冲，晚期可能为伸展，但还有待进一步研究。

南迦巴瓦地区北侧和东、西两侧均有反映缝合

带的蛇绿混杂岩出露,主地幔断裂活动性质早期为逆冲,主期和晚期均以伸展拆离为主。蛇绿混杂岩带和主地幔断裂被以南迦巴瓦峰为中心的放射状高角度脆性正断层所截切。

2个构造结的东、西边界都分别有右行和左行走滑运动分量。

**3.1.3 高喜马拉雅结晶岩系** 东、西构造结地区高喜马拉雅结晶岩系上都缺失在喜马拉雅造山带中普遍存在的特提斯沉积岩系(在特提斯盆地中几乎从寒武纪到始新世连续沉积),使得高喜马拉雅变质岩系直接和主地幔断裂接触。在东构造结地区藏南拆离系同主地幔断裂相汇在一起,并表现为正断层。

两地高喜马拉雅结晶岩系的原岩大致相当,为泥岩—碎屑岩+大理岩+中酸性侵入岩,火山岩较少。在东构造结,泥岩和碎屑岩出露在下部,大理岩主要集中在上部。原岩的形成时代也很相似,西构造结下部片麻岩的原岩年代为1850 Ma,中上部原岩的年龄为400~500 Ma;东构造结下部片麻岩的原岩年代为1312 Ma,花岗质侵入岩的年龄为582 Ma。

两者都有高压变质岩产出。西构造结高喜马拉雅结晶岩系中的柯石英榴辉岩的原岩均为基性岩浆岩,变质条件为650℃和2.6 GPa,变质年龄是(49±7)Ma。东构造结中的高压麻粒岩为副变质岩,变质条件为890℃,(1.7~1.8)×10<sup>5</sup> kPa,变质年龄是69~45 Ma。从两者的变质作用时间估算出的陆—陆碰撞时代(75 Ma±)基本相当,因为前者的形成深度比后者深20~30 km,需要的时间也长。从2个构造结向喜马拉雅造山带中部,卷入到缝合带里的地层基本对称,并且越来越多,时代也越来越年轻,表明构造结地区印度—欧亚板块之间的碰撞作用基本同步进行,早于中部地区。

25 Ma以来,它们经历了许多相似的演化过程。南迦帕尔巴特地体的核部还叠加了更新世—上新世(1~11 Ma)的高级变质作用和部分熔融作用。南迦帕尔巴特地区的平均剥露速率为0.83~1.12 mm/a,即25 Ma以来,19.3~28 km的上覆物质被剥蚀,10 Ma以来的剥露速率平均为(4.5±1.1) mm/a,1 Ma以来至少有14 km的物质被剥蚀掉。南迦巴瓦地区以多雄拉混合岩为代表的混合岩岩化和深熔作用的发生时间大约为5 Ma。根据高压麻粒岩的快速退变组合的温压条件和形成时代,23 Ma以来,大约有13.2~19.8 km的上覆物质被剥蚀,上新世以来南迦巴瓦地区经历了快速剥蚀作用,5 Ma以来的平

均剥蚀速率高达3.6 mm/a,在3.5~3.2 Ma时间段为10 mm/a,2.2 Ma至今为3~5 mm/a(Burg *et al.*, 1997)。

### 3.2 主要的不同之处

(1)南迦巴瓦地区具半封闭的穹隆构造形态,而西构造结为北东走向的背型。(2)南迦巴瓦地区25 Ma以来的伸展拆离作用机制表现得非常突出。

## 4 讨论与结论

喜马拉雅造山带的东西构造结不仅有着许多相似的地貌和地质特征,而且也有相似的演化历史。因此,它们应该具有相同的成因。

Burg and Podladchikov(1999)通过模拟实验提出,从大陆岩石圈的弯曲作用到非对称的褶皱作用导致了喜马拉雅构造结的形成。他们认为,大陆岩石圈的弯曲作用是大规模地壳收缩作用的基本产物也是造山作用的有效过程。

Beaumont *et al.* (2001)提出,喜马拉雅—西藏构造样式和格局是中下地壳低粘性物质沿通道向地表剥露作用(denudation)强烈地方流动所致。在他们的热力学模式中,喜马拉雅南坡的高喜马拉雅地带降雨丰富,是剥露作用最强的地方,在喜马拉雅山脉中下地壳中形成的部分熔融体是低粘性物质,藏南拆离系(STD)是运移通道。该模式强调了地表剥蚀作用和熔融物的流动作用。

笔者认为,构造结地区深熔作用不仅普遍,而且持续时间长、规模大,地表剥露和河流的侵蚀、搬运能力很强,是Beaumont *et al.* (2001)提出的构造模式发生的最佳场所,该模式很适合构造结地区。

## References

- Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 444:738—742.
- Burg, J. P., Davy, P., Nievergelt, P., et al., 1997. Exhumation during crustal folding in the Namche-Barwa syntaxis. *Terra Nova*, 9:53—56.
- Burg, J. P., Nievergelt, P., Oberli, F., et al., 1998. The Namche Barwa syntaxis: Evidence for exhumation related to compressional crustal folding. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16:239—252.
- Burg, J. P., Podladchikov, Y., 1999. Lithospheric scale fold-

- ing; Numerical modeling and application to the Himalayan syntaxes. *International Journal of Earth Sciences*, 88;190—200.
- Butler, R. W. H., Prior, D. J., 1988. Tectonic controls on the Nanga Parbat Massif, Pakistan Himalayas. *Nature*, 333;247—250.
- Chamberlain, C. P., Jan, M. Q., Zeitler, P. K., 1988. Pressure-temperature-time paths in the Nanga Parbat Massif; Constraints on the tectonic development of the northwest Himalayas. *Geological Society of America Special Paper*.
- Chamberlain, C. P., Zeitler, P. K., Erickson, E., 1991. Constraints on the tectonic evolution of the northwestern Himalaya from geochronology and petrologic studies of Babusar Pass, Pakistan. *J. Geol.*, 99;829—849.
- Chamberlain, C. P., Zeitler, P. K., Jan, M. Q., 1989. The dynamics of the suture between the Kohistan island arc and the Indian plate in the Himalaya of Pakistan. *J. Metamorphic Geol.*, 77;135—149.
- Ding, L., Zhong, D. L., 1999. Metamorphism of high-pressure granulite facies rocks from Najabawa, eastern Tibet and its tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 29(5):385—397 (in Chinese).
- Ding, L., Zhong, D. L., Yin, A., et al., 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). *Earth and Planetary Science Letters*, 192;423—438.
- Guillot, S., Lardeaux, J. M., Mascle, G., et al., 1995a. Un nouveau témoin du métamorphisme de haute pression dans la chaîne himalayenne (Dôme du Tso Moriri, Est Ladakh). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320;931—936.
- Guillot, S., Mascle, G., Lardeaux, J. M., et al., 1995b. A new discovery of eclogites from the Himalaya, Tso Moriri dome unit (northwestern India). *Mitt. Geol. Inst. ETH Zurich Univ. Zurich Neue Folge*, 298;84—87.
- Guillot, S., Sigoyer, D. J., Lardeaux, J. M., et al., 1997. Eclogitic metasediments from the Tso Moriri area (Ladakh, Himalaya): Evidence for continental subduction during India-Asia convergence. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 128;197—212.
- Jin, Z. M., 1999. Discovery of coesite-bearing eclogite from West Himalayan tectonic link and its enlightenment. *Geological Science and Technology Information*, 18(3):1—5 (in Chinese with English abstract).
- Le Fort, P., Guillot, S., Pecher, A., 1997. HP metamorphic belt along the Indus suture zone of NW Himalaya; New discoveries and significance. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 325;773—778.
- Liu, Y., Zhong, D. L., 1998. Petrology of high-pressure granulites from eastern Himalaya; Implications to tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3);267—281 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Zhong, D. L., 1997. Petrology of high-pressure granulite from the eastern Himalayan syntaxis. *J. Metamorphic Geol.*, 15;451—466.
- Madin, I. P., 1986. Structure and neotectonics of the northwestern Nanga Parbat-Haramosh Massif (Dissertation). Oregon State University.
- O'Brien, P. J., Law, R., Trelar, P. J., 1998. The subduction and exhumation history of the Indian plate during Himalayan collision; Evidence from rare eclogite. Annual Report, Bayerisches Forschungsinstitut Für Experimentelle Geochemie Und Geophysik, 75—76.
- Pognante, V., Spencer, D. A., 1991. First report of eclogites from the Himalayan belt, Kaghan valley (northern Pakistan). *European Journal of Mineralogy*, 3; 613—618.
- Searle, M. P., 1996. Cooling history, erosion, exhumation, and kinematics of the Himalaya-Karakoram-Tibet orogenic belt. In: Yin, A., Harrison, T. M., eds., *The tectonic evolution of Asia*. Cambridge Univ. Press, New York, 37—110.
- Seeber, L., Gornitz, V., 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, 92;335—367.
- Smith, H. A., Chamberlain, C. P., Zeitler, P. K., 1992. Documentation of Neogene regional metamorphism in the Himalayas of Pakistan central thrust. *J. Metamorphic Geol.*, 7;73—93.
- Tahirikheli, R. A. K., Jan, M. Q., 1979. Geology of Kohistan, Karakorum Himalaya, northern Pakistan. *Geological Bulletin, University of Peshawar*, 11;189.
- Tonarini, S., Vills, I., Oberli, F., 1993. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalayas; Implications for India-Eurasia collision. *Terra, Nova*, 5;13—20.
- Wang, T. W., Ma, R., 1996. Characteristics of metamorphism in Najabawa region, Tibet. *Journal of Changchun College of Geology*, 26(2);152—158 (in Chinese with English abstract).
- Zeitler, P. K., Chamberlain, C. P., 1991. Petrogenetic and tectonic significance of young Leucogranites from the northwestern Himalaya, Pakistan. *Tectonics*, 10; 729—741.

- Zeitler, P. K., Chamberlain, C. P., Smith, H. A., 1993. Synchronous anatexis, metamorphism, and rapid denudation at Nanga Parbat (Pakistan Himalaya). *Geology*, 24(4): 347—350.
- Zeitler, P. K., Sutter, J. F., Williams, I. S., 1989. Eochronology and temperature history of the Nanga Parbat Haramosh Massif, Pakistan. *Geological Society of America Special Publication*, 232.
- Zhang, J. J., Ji, J. Q., Zhong, D. L., et al., 2003. Study of tectonic framework and its forming process of eastern Himalayan Najabawa syntaxis. *Science in China (Series D)*, 33(4): 373—383 (in Chinese).
- Zhang, Q., Li, S. H., 1981. Metamorphism and metamorphic belts in Xizang. Science Press, Beijing, 271—312 (in Chinese).
- Zhang, Z. G., Liu, Y. H., Wang, T. W., et al., 1992. Geology of Najabawa areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, L. L., Geng, Q. R., Dong, H., et al., 2003. The discovery and significance of the relicts of ophiolitic mélanges along the Parlung Zangbo in the Bomi region, eastern Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(1): 27—30 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. L., Pan, G. T., Jin, Z. M., et al., 2001. Preliminary study of western Himalayan syntaxis and its enlightenments. *Geological Review*, 47(4): 350—355 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 丁林, 钟大赉, 1999. 西藏南迦巴瓦地区高压麻粒岩相变质作用及其构造地质意义. *中国科学(D辑)*, 29(5): 385—397.
- 金振民, 1999. 喜马拉雅造山带西构造结合柯石英榴辉岩的发现及其启示. *地质科技情报*, 18(3): 1—5.
- 刘焰, 钟大赉, 1998. 东喜马拉雅地区高压麻粒岩岩石学研究及构造意义. *地质科学*, 33(3): 267—281.
- 王天武, 马瑞, 1996. 西藏东部南迦巴瓦地区变质作用特征. *长春地质学院学报*, 26(2): 152—158.
- 张进江, 季建清, 钟大赉, 等, 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. *中国科学(D辑)*, 33(4): 373—383.
- 张旗, 李绍华, 1981. 西藏的变质作用和变质带. 北京: 科学出版社, 271—312.
- 章振根, 刘玉海, 王天武, 等, 1992. 南迦巴瓦峰地区地质. 北京: 科学出版社.
- 郑来林, 耿全如, 董翰, 等, 2003. 波密地区帕龙藏布残留蛇绿混杂岩带的发现及其意义. *沉积与特提斯地质*, 23(1): 27—30.
- 郑来林, 潘桂棠, 金振民, 等, 2001. 喜马拉雅造山带西构造结的启示. *地质论评*, 47(4): 350—355.