

·特 稿·

印度/亚洲碰撞——南北向和东西向拆离构造 与现代喜马拉雅造山机制再讨论

许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 崔军文, 李海兵, 陈方远

XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, QI Xue-xiang, CUI Jun-wen,

LI Hai-bing, CHEN Fang-yuan

中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

Key Laboratory of Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources,

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:印度/亚洲碰撞形成的喜马拉雅增生地体由特提斯-喜马拉雅(THM)、高喜马拉雅(GHM)、低喜马拉雅(LHM)和次喜马拉雅(SHM)亚地体组成。通过喜马拉雅增生地体中变质基底和盖层的组成、变质演化、变形机制与形成时代的对比, 确定高喜马拉雅(GHM)亚地体北缘的藏南拆离断裂(STD)向北延伸于特提斯-喜马拉雅(THM)亚地体之下, 与形成在大于650°C温度、具有自南向北剪切滑移性质的康马-拉轨岗日拆离带(KLD)相连, 深部地壳局部熔融、物质上涌造成的花岗岩侵位, 使康马-拉轨岗日拆离带隆起, 形成康马-拉轨岗日穹隆带。在高喜马拉雅(GHM)亚地体北部(普兰-吉隆-聂拉木-亚东一带)的变质基底与盖层之间发现EW向近水平的高喜马拉雅韧性拆离构造(GHD), 以发育EW向拉伸线理、缓倾的糜棱面理及具有自西向东水平滑移为特征; 而在GHM南部靠近主中央冲断裂(MCT)北侧发育具有挤压转换性质的韧性走滑-逆冲断层。高喜马拉雅亚地体从南到北具有由逆冲→斜向逆冲→EW向伸展→斜向伸展→SN向伸展的连续变形和转换的特征, 是在现代喜马拉雅垂向挤出和侧向挤出的耦合造山机制下综合变形的响应。喜马拉雅地体中的东西向和南北向拆离构造的存在为喜马拉雅现代造山机制再讨论提供了基础。

关键词:喜马拉雅; NS 向和EW向拆离构造; 垂向和侧向挤出; 造山机制

中图分类号: P542⁺.4; P542⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2006)01~02-0001-14

Xu Z Q, Yang J S, Qi X X, Cui J W, Li H B. India-Asia collision: A further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (1-2): 1-14

Abstract: India-Asia collision formed the Himalaya accretionary terrane, which is composed from north to south of the Tethys-Himalaya (THM), Greater Himalaya (GHM), Lesser Himalaya (LHM) and Subhimalaya (SHM) subterrane. Comparison of the compositions, metamorphisms and evolutions, deformation mechanisms and formation ages of metamorphic basement and covers in the Himalaya accretionary terrane indicates that the southern Tibet detachment (STD) on the northern margin of the GHM subterrane extends northward beneath the THM subterrane and is connected with the Kangmar-Lhagoi Kangri detachment (KLD) that formed at >650°C and has the nature of north-directed shear slip motion, and that partial melting of the crust and material upwelling resulted in granite emplacement and uplift of the KLD, forming the Kangmar-Lhagoi Kangri gneiss domes. An E-W-trending subhorizontal ductile detachment (GHD) is found between the metamorphic basement and cover in the northern part (Burang-Gyirong-Nyalam-Yadong area) of the GHM subterrane, which is charac-

收稿日期: 2006-02-08; 修订日期: 2006-02-14

科技项目: 国土资源部科技专项《青藏高原的碰撞造山及其效应》的课题《青藏高原地体边界及岩石圈剪切断裂》资助。

作者简介: 许志琴(1941-), 女, 研究员, 中国科学院院士, 从事大地构造学及构造地质学研究。

terized by E-W stretching lineation and gently dipping mylonitic foliation and shows the east-directed horizontal slip shear sense; whereas near the north side of the Main Central Thrust (MCT) in the southern part of the GHM subterrane there occur ductile strike slip-thrust faults of transpressional nature. From south to north the GHM subterrane has the features of continuous deformation and transition from Thrust→oblique thrust→E-W trending extension→oblique extension→S-N trending extension, which are the response to the composite deformation under the orogenic mechanism of coupling of vertical and lateral extrusions. The existence of the E-W- and N-S-trending detachments in the Himalaya terrane provide a basis for a further discussion of the modern orogenic mechanism of the Himalayas.

Key words: Himalaya; N-S- and E-W-trending detachments; vertical and lateral extrusions; orogenic mechanism

1 前言

印度/亚洲于(55±10)Ma碰撞之后,板块之间的作用并未终止,印度板块仍以44~50 mm/a的速率往北推进,致使亚洲大陆一侧1800 km(西部)和2750 km(东部)的南北向缩短量被吸收^[1],形成2倍于正常地壳厚度的巨厚陆壳体(平均厚度70km),在青藏高原南缘形成喜马拉雅增生地体。印度/亚洲碰撞导致喜马拉雅造山带崛起(包括变质、变形、隆升与剥蚀作用)和青藏高原隆升事件已为许多学者所描述^[1~9],碰撞造成的青藏高原南缘大量物质向SE方向逃逸(侧向挤出)的观点^[10~13]为越来越多的地学家接受,经研究确定的喜马拉雅增生地体的结构及边界断裂已经成为造山带的经典。

长期以来现代喜马拉雅造山带的形成引起地学家们的极大兴趣,特别是制约高喜马拉雅结晶变质岩片的自20 Ma以来形成的主中央冲断裂(MCT)和藏南拆离断裂(STD)备受关注。Chemenda等^[14]曾通过陆-陆碰撞岩石圈模拟实验提出了岩石圈板片的“挤牙膏”式折返模式,即岩石圈板片俯冲过程中造成底侵构造并形成冲断裂,在折返过程中岩石圈板片像牙膏一样挤出,并伴随正断裂产生。该模式可用以解释喜马拉雅的造山机制,即主中央冲断裂(MCT)和藏南拆离断裂(STD)夹持的高喜马拉雅结晶变质岩片是在南北向18 mm/a的挤压缩短率下垂向挤出机制下折返的。

提出的问题是:在印度/亚洲陆-陆碰撞中,喜马拉雅的垂向挤出与青藏东南缘的侧向挤出之间的关系是如何在高喜马拉雅增生地体的新生代变形记录中体现的?本文将通过喜马拉雅增生地体中现代喜马拉雅变形几何学、运动学及变形机制转换的微观—宏观构造的研究,重新厘定藏南拆离断裂(STD)的规模及其形成条件,揭示在高喜马拉雅增生地体中垂向挤出和侧向挤出的变形反映,进一步解析高喜马拉雅崛起的造山机制。

2 构造背景

喜马拉雅增生地体呈向南突出的EW向弧形展布,长2500 km,宽300~500 km,北侧以印度斯-雅鲁藏布江缝合带与拉萨地体南部的冈底斯活动陆缘带为邻,南侧以喜马拉雅前锋冲断裂(MFT)与印度地台上的西瓦里克前陆磨拉石盆地为界。喜马拉雅增生地体的东侧为由呈NS向的三盖-民垭右行走滑断裂及伴随的褶皱-逆冲带组成的挤压转换带,延

长2000 km以上,并与印度尼西亚岛弧带相连;西侧为由呈近NS向的恰曼左行走滑断裂及伴随的褶皱-逆冲带组成的挤压转换带,延长1000 km。2条挤压转换带往北分别系在喜马拉雅的东构造结(Namche Barwa)和西构造结(Nanga Parbat)上,与喜马拉雅带相连(图1)。

喜马拉雅增生地体自北往南分为4部分:特提斯-喜马拉雅亚地体(THM)、高喜马拉雅(GHM)亚地体、低喜马拉雅(LHM)亚地体和次喜马拉雅(SHM)亚地体(图2)。特提斯-喜马拉雅(THM)亚地体与高喜马拉雅(GHM)亚地体的界线为藏南拆离断裂(STD),高喜马拉雅(GHM)亚地体与低喜马拉雅(LHM)亚地体的界线为主中央冲断裂(MCT),低喜马拉雅(LHM)亚地体与次喜马拉雅(SHM)亚地体的界线为主边冲断裂(MBT),次喜马拉雅(SHM)亚地体与印度克拉通的界线为主前锋冲断裂(MFT)^[4~7,9,15~17]。主中

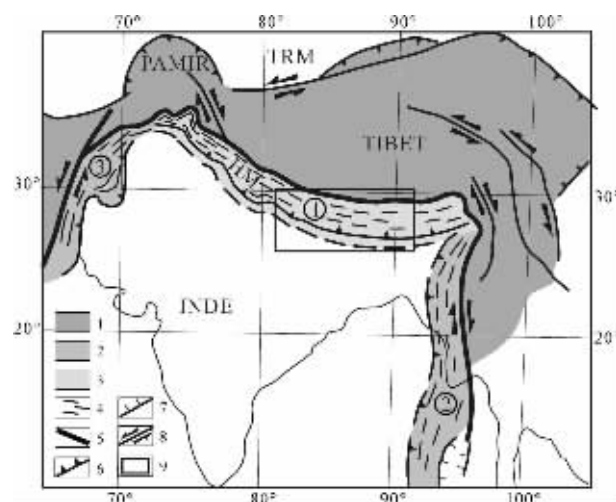


图1 青藏高原-喜马拉雅构造简图

(本图底图由Mattauer提供)

Fig.1 Tectonic sketch map

of the Qinghai-Tibet Plateau and Himalayas

- 1—高原;2—喜马拉雅增生地体;3—喜马拉雅东、西侧挤压转换带;4—构造线;5—缝合带;6—逆冲断层;7—正断层;
- 8—走滑断层;9—图2范围;INDE—印度板块;TIBET—青藏高原;TRM—塔里木地块;PAMIR—帕米尔高原;HM—喜马拉雅;
- ①喜马拉雅主带;②③喜马拉雅东侧带和西侧带

央冲断裂(MCT)和藏南拆离断裂(STD)均为强变形的韧性剪切带,在尼泊尔MCT厚达6 km,STD的厚度约1 km。

2.1 特提斯-喜马拉雅亚地体

特提斯-喜马拉雅 (THM) 亚地体呈EW向弧形带状延展,宽达100~120 km。出露印度陆块的变质基底和古生代—中生代被动陆缘盖层,南部的古生代地层由于拆离作用明显减薄或缺失。

特提斯-喜马拉雅 (THM) 亚地体的北界——雅鲁藏布江缝合带由白垩纪日喀则群弧前盆地、蛇绿岩带和混杂堆积带组成。白垩纪日喀则群弧前盆地宽达10~30 km,沿冈底斯火山岛弧带南缘分布,变形以东西轴向宽缓褶皱为特征,其底部为著名的雅鲁藏布江蛇绿岩带。位于蛇绿岩带以南的混杂堆积带宽20~40 km,以三叠纪—白垩纪复理石为基质,含有大量灰岩、硅质岩和蛇绿岩的块体,基质的变形表现为紧密的同劈理褶皱,轴面向南陡倾,往南渐缓。

特提斯-喜马拉雅 (THM) 亚地体以发育大片显生宙沉积盖层为特征。在亚地体中部的拉轨岗日—康马250 km范围内出露8个大小不等的变质穹隆,变质穹隆核部由拉轨岗日群组成,为一套高角闪岩相的副变质岩系和混合岩化片麻状花岗岩组合,与高喜马拉雅的聂拉木群相似。最新的锆石SHRIMP U-Pb测年表明,拉轨岗日—康马变质穹隆带的基底岩石——花岗质片麻岩的原岩形成时代为835~869 Ma,并经历了泛非造山事件(504~528 Ma)的影响。古生代基本上为一套连续沉积的稳定的台型碳酸盐岩—碎屑岩沉积,属印度地台沉积盖层,总厚逾3300 m。沉积盖层与前震旦纪变质基底之间的强烈拆离,使震旦纪—寒武纪岩石变质成石榴黑云片岩及绿泥石英片岩,其与古生代盖层一并减薄^[16,18]。康马穹隆边部发现下奥陶统的底砾岩^[19,20],并提出底砾岩可作为泛非事件的地质标志^[21],这一认识与上述泛非事件的年代学测定结果吻合。变质穹隆带的南北两侧发育中生代—始新世的海相沉积盆地,侏罗纪—白垩纪地层的变形以轴向东西、宽缓的同心弯滑褶皱为特征;三叠纪—白垩纪复理石地层变形以含破劈理的圆滑褶皱和含流劈理的尖棱褶皱组合为特征,轴向东西,轴面近直立。中生代地层的变形样式反映了上部收缩与下部压扁的机制。

2.2 高喜马拉雅 (GHM) 亚地体

高喜马拉雅 (GHM) 亚地体呈EW向宽150km的弧形展布,出露大范围的前震旦纪变质岩。高喜马拉雅的前震旦纪变质岩属印度地台北缘结晶基底的组分,在主带上称聂拉木群,为一套高角闪岩相的富铝变质岩系,局部混合岩化,原岩是砂岩及砂质粘土岩,总厚6000~9000 m。前人曾认为喜马拉雅地体变质基底岩石的形成年龄为中新元古代^[21~23]。最近运用锆石SHRIMP U-Pb测年获得普兰片麻岩的最老年龄值为1863.8 Ma,表明聂拉木群的时代应为中新元古代。并记载了高喜马拉雅亚地体的变质基底岩石卷入泛非—早古生代事件(529~457 Ma)的历史。

值得注意的是,在西构造结南迦帕尔巴特的喀格罕山

谷、斯达克及东拉达克地区先后找到榴辉岩^[26~29],O'Brien等(1998)又在喀格罕山谷榴辉岩中发现了柯石英包裹体,计算了含柯石英的UHP榴辉岩的温压条件为650℃和2.6 GPa,超高压变质年龄为49 Ma $\pm$ 7 Ma^[30],推测西构造结地区的印度/亚洲碰撞时间应早于49 Ma,并且经历了大约49 Ma以来的陆壳深俯冲和折返作用。

在东构造结南迦巴瓦群中高压麻粒岩的发现及研究表明,前震旦纪的变质基底曾到达下地壳的深度($T=750\sim 850^{\circ}\text{C}$, $p=1.4\sim 1.8\text{ GPa}$),其峰变质年龄为45~69 Ma。高喜马拉雅结晶岩系中分布有平行喜马拉雅构造线走向的浅色花岗岩带,主要岩石类型有电气石花岗岩、白云母花岗岩和二云母花岗岩,属S型花岗岩,岩体常伴随有强烈的混合岩化、流劈理化和糜棱岩化作用。岩体的同位素年龄值有4组:1800~650 Ma、500~400 Ma、43.3 Ma和18.6~10.5 Ma^[1]。

高喜马拉雅 (GHM) 亚地体中沉积盖层发育齐全,包括古生代、中生代、古—始新统的海相沉积及渐新世以来的陆相沉积。在高喜马拉雅亚地体的加里满都—甘托克一带,高喜马拉雅结晶岩片之下出露若干个为MCT制约的由低喜马拉雅新元古代—寒武纪绿片岩相组成的构造窗和半构造窗。由于特提斯-喜马拉雅 (THM) 亚地体的沉积盖层与高喜马拉雅 (GHM) 亚地体结晶变质岩系之间的强烈拆离 (STD),拆离层上部的震旦纪—寒武纪岩石强烈变质并且减薄,位于喜马拉雅东段的古生代地层几乎全部缺失,三叠系直接覆盖在高喜马拉雅结晶岩系之上。

2.3 低喜马拉雅 (LHM) 亚地体

低喜马拉雅 (LHM) 亚地体位于喜马拉雅结晶岩带的南侧,震旦系—下古生界绿片岩相浅变质岩系以主中央冲断裂 (MCT) 与高喜马拉雅结晶岩系相隔,大致可与特提斯喜马拉雅 (THM) 亚地体的震旦系—下古生界相对比,同属于印度地台的盖层沉积。上古生界分布在震旦系—下古生界以南,为冈瓦纳系沉积,因缺乏化石依据,暂定为石炭系—二叠系。主要岩性为黑色页岩、含杂岩屑的泥岩和长石石英砂岩。低喜马拉雅 (LHM) 亚地体沿主边冲断裂 (MBT) 叠置在次喜马拉雅 (SHM) 亚地体之上。

2.4 次喜马拉雅 (SHM) 亚地体

由中中新世—第四纪西瓦里克沉积盆地组成,盆地西起巴基斯坦的白沙瓦,东延经西里克山、印度阿萨姆,至缅甸的掸邦高原,长达数千公里,为总厚达6000 m的前陆盆地山麓相沉积。次喜马拉雅 (SHM) 亚地体沿喜马拉雅前锋冲断裂 (MFT) 往南推覆在印度克拉通之上。

3 喜马拉雅地体中的SN向和EW向大型韧性拆离构造

笔者的研究工作是在中国境内的雅鲁藏布江缝合带及以南的特提斯-喜马拉雅和高喜马拉雅亚地体中进行的。穿越的4条剖面(自东而西)为:仁布—江孜—康马—嘎拉—亚东剖

面、门布-赖西-聂拉木-樟木剖面、萨噶-马拉-吉隆-吉隆镇剖面和门土-普兰剖面,经过的地层有:属于雅鲁藏布江俯冲杂岩带的白垩纪日喀则群弧前盆地、蛇绿岩带、三叠纪—白垩纪复理石为基质的混杂堆积和厚逾1000 m的属于印度次大陆被动陆缘的晚白垩世海相沉积、三叠纪—早侏罗世厚1000 m左右的陆棚-斜坡相浅水—半深水相碳酸盐岩—碎屑岩类复理石沉积、泥盆纪—二叠纪浅海相碎屑岩—碳酸盐岩沉积、早古生代浅变质碎屑岩—碳酸盐岩以及由聂拉木群前震旦纪角闪岩相—绿片岩相的孔兹岩系(形成年龄为800~1800 Ma)为代表的变质基底。通过构造变形几何学、运动学和动力学的研究,进一步确定了喜马拉雅增生地体中的SN向拆离构造——位于特提斯—喜马拉雅和高喜马拉雅亚地体之间的藏南拆离断裂带(STD)与位于特提斯—喜马拉雅亚地体中的康马—拉轨岗日拆离带(KLD)的关系,高喜马拉雅亚地体中新发现EW向拆离构造的存在,讨论了变形机制的内在联系(图2)。

3.1 特提斯—喜马拉雅 (THM) 亚地体中的SN向拆离构造

在特提斯—喜马拉雅(THM)亚地体中部的吉隆—拉轨岗日—康马300 km的长度范围内,出露8个以元古宙变质基底岩石为核部和被古生代—中生代地层围绕的穹隆构造,自东向西依次为曲松穹隆、仁布穹隆、康马穹隆、哈桑桑惹穹隆、萨迦穹隆、拉轨岗日穹隆(普弄抗日、总布荣和阿马穹隆)和吉隆穹隆。平面上呈圆形、椭圆形及长条形等几何形态,又称康马—拉轨岗日穹隆带。

Burg等^[4]最早提出康马穹隆核部由变形的眼球状片麻岩组成,形成年龄为 $562 \text{ Ma} \pm 4 \text{ Ma}$ (U-Pb)^[5]。康马变质基底与古生代—中生代盖层之间的拆离断层(STD)为NS向伸展变形的产物,形成时代由正片麻岩的黑云母坪年龄 $20.4 \text{ Ma} \pm 0.6 \text{ Ma}$ 和白云母坪年龄 15.5 Ma 而确定^[6]。

笔者通过对康马穹隆的详细微构造观测和研究获得以下进一步的认识(图3、图2)。

(1)康马穹隆核部为聂拉木群的富铝深变质岩系,呈NS向椭圆状产出,叶理面向四周缓倾,倾角 $10^\circ \sim 25^\circ$ 。康马变质穹隆的基底岩石——花岗质片麻岩的原岩形成时代为835~869 Ma,并经历了泛非造山事件(504~528 Ma)的影响^[7]。聂拉木群之上出露盖层震旦纪—奥陶纪、泥盆纪—二叠纪及三叠纪地层,逐次围绕在聂拉木群的四周,盖层强烈变形及减薄。

(2)康马穹隆变质基底的聂拉木群片麻岩与盖层之间发育由基底的花岗质糜棱岩和盖层的千糜岩组成的厚约250 m的韧性拆离剪切带,穹形产出。糜棱面理上发育由长英质脉的布丁构造和石榴子石压力影构成的拉伸线理,在穹隆北部为SN向,南部为NWN—SES向。剪切带中发育平行拉伸线理方向的紧闭“A”型褶皱。XZ面上的S/C构造、 σ 型长石碎斑体系及长英质脉的不对称褶皱等剪切应变均显示了自南而北(或自南南东至北北西)的运动方向(图3、图4)。糜棱面理(S1)的重褶形成S2面理,S2上同样发育NS向拉伸线理及形成以S2为轴面的“B”型褶皱。震旦纪—奥陶纪、泥盆纪—二叠纪地层及三叠纪地层之间自下而上发育由韧性→脆性转化、

厚度由几十米减薄到几米、拆离方向自南而北的次级拆离断层带,均显示了自南而北的剪切应变特征。后期的改造使拆离断层带呈现穹形构造样式,核部聂拉木群变质岩系出露地表。

(3)石英组构的EBSD测定。运用先进有效的电子背散射(electron backscatter diffraction,EBSD)技术,通过观测反向散射电子的衍射图像来提供微米级的晶体空间取向信息,使用日本电子公司(JEOL)制造的jsm-56101v型扫描电镜和丹麦HKL公司制造的CHANNEL5型号的EBSD仪器,将样品的XZ面定向薄片(X轴为拉伸线理方向,XY面为面理,Z轴垂直面理方向)精细抛光后置于20kV的扫描电镜电子束电压下,首先利用EBSD系统确定矿物的电子背散射通道衍射花样(electron backscatter pattern,EBSP),标明衍射点的指数,然后在薄片范围内进行石英颗粒的优选方位测定,每类矿物大约测试3000~15000点。采集康马穹隆变质基底与盖层之间主拆离韧性剪切带中5个样品的石英颗粒进行测定,3个样品为变质基底的糜棱岩化花岗片麻岩(HH5、HH6、HH8),2个样品为盖层底部震旦纪—寒武纪的千糜岩化石榴子石石英片岩(HH18)和石英片岩(HH95),所测数据点的范围为2538~6887。通过下半球投影获得的石英EBSD图(图5-A)显示了基底糜棱岩化花岗片麻岩的石英组构类型为中高温($450 \sim 550^\circ\text{C}$)棱面(10 $\bar{1}$ i)<a>组构、柱面(10 $\bar{1}$ 0)<a>组构和高温(> 650°C)柱面(10 $\bar{1}$ 0)<c>组构,剪切指向为自南向北;盖层底部千糜岩化石榴子石石英片岩(HH18)和石英片岩的石英组构表现为早期中高温($450 \sim 550^\circ\text{C}$)菱面(10 $\bar{1}$ i)<a>组构和叠置后期的低温(< 350°C)底面(0001)<a>组构,剪切指向同样为自南向北(图6)^[8]。表明康马拆离带形成于高温(> 650°C)条件下,并经历了中温($450 \sim 550^\circ\text{C}$)→中低温($350 \sim 450^\circ\text{C}$)→低温(< 350°C)的递退过程^[9]。

上述研究表明,康马穹隆的形成主要经历了20 Ma以来的伸展作用,形成基底与盖层之间自南而北的韧性拆离断层,继后东西向挤压使韧性拆离断层弯曲,形成穹隆构造。

李德威等^[5]在研究藏南萨迦的拉轨岗日穹隆带时同样提出NS向拆离构造带的存在。拉轨岗日穹隆带由3个小穹隆——普弄抗日、总布容和阿马穹隆组成,穹隆核部的花岗片麻岩、混合花岗岩夹角闪斜长岩和榴闪岩的深变质岩系之上为由云母石英片岩、石榴子石云母片岩、十字石蓝晶石片岩、石英岩和大理岩组成的薄层中等变质(角闪岩—绿片岩相)岩系,其周围分别与下二叠统、三叠系和下侏罗统未变质岩系直接接触,缺失整个早古生代—泥盆纪地层^[5]。笔者认为,穹隆核部深变质岩系之上的中等变质岩系可与康马穹隆拆离带之上的新元古代—寒武纪变质岩系对比,并且在穹隆的核部均有淡色花岗岩底辟侵位。因此,康马—拉轨岗日穹隆带中包含了同一条SN向拆离断层带的证据,可称为“康马—拉轨岗日拆离断层带”(KLD)。

3.2 藏南拆离断层(STD)与康马—拉轨岗日拆离断层

(KLD)的连接

藏南拆离带(STD)是特提斯—喜马拉雅亚地体(THM)

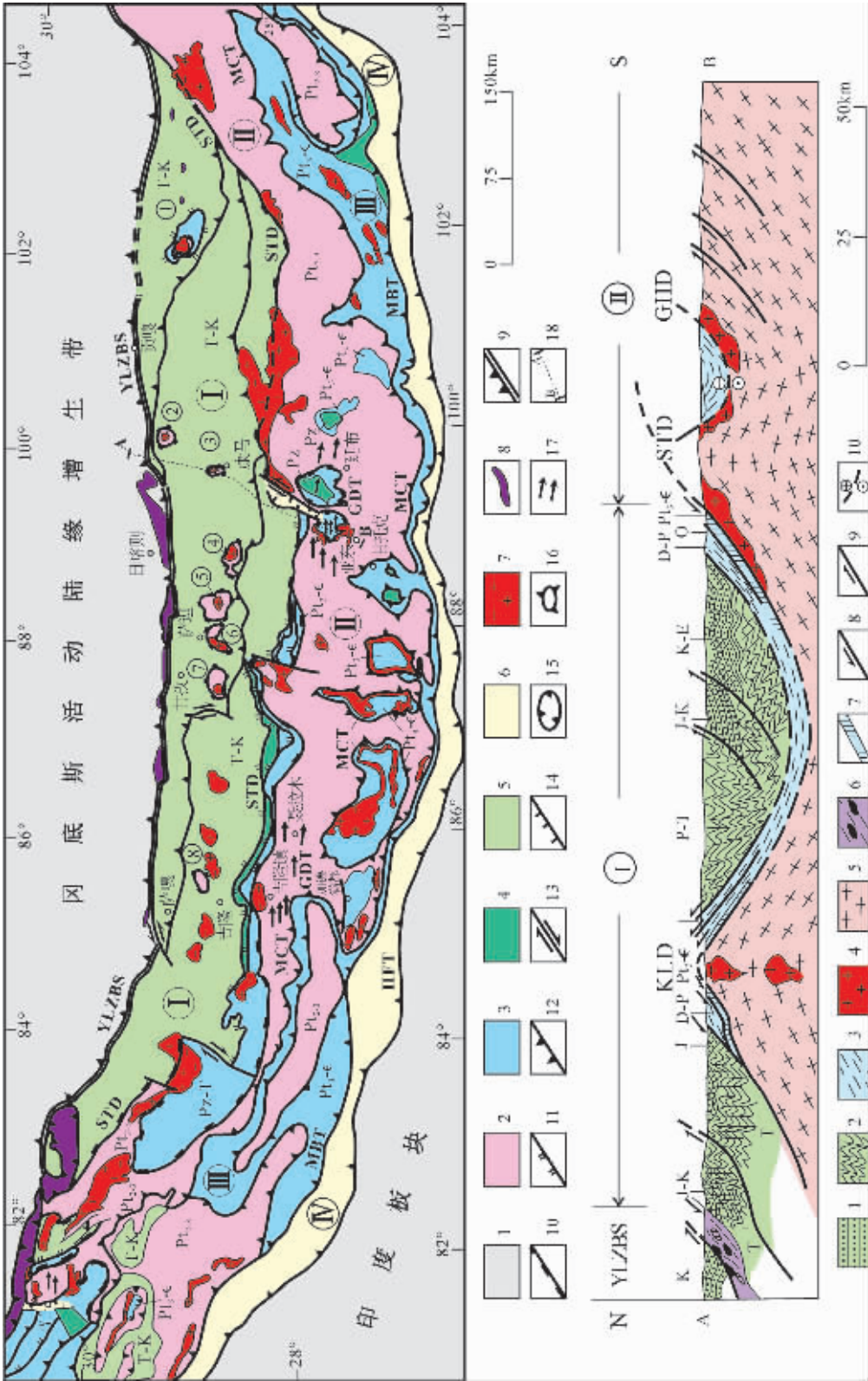


图2 高喜马拉雅地体中东段(普兰—亚东地区)构造图(上)及构造剖面图(下)

Fig.2 Tectonic map and section of the east-central segment (Burang-Yadong area) of the Greater Himalaya subterranean

构造图:1—喜马拉雅地体周缘地区;2—古—中元古代变质基底岩石;3—新元古代—早古生代地层;4—晚古生代地层;5—中生代地层;6—新生代地层;7—花岗岩;8—蛇纹岩;9—缝合带;10—主拆离断层;11—拆离断层;12—逆冲断层;13—走滑断层;14—正断层;15—飞来峰;16—构造窗;17—滑移方向;18—构造剖面位置

构造剖面图:1—中、新生代沉积;2—三叠纪同槽褶皱;3—古生代盖层;4—淡色花岗岩;5—元古宙片麻岩;6—俯冲杂岩带;7—新元古代—寒武纪变质片岩;8—剪切运动方向;9—逆冲断裂;10—拆离断面上盘向外(E)下盘向外(W)运动。I—特提斯—喜马拉雅地体;II—高喜马拉雅地体;III—低喜马拉雅地体;IV—次喜马拉雅地体;YLZBS—雅鲁藏布江缝合带;KLD—康马—拉纳日拆离带;STD—藏南拆离带;GHD—高喜马拉雅拆离带;MCT—主中央断层;MBT—主边断层;MFT—主前断层;①—③变质穹隆

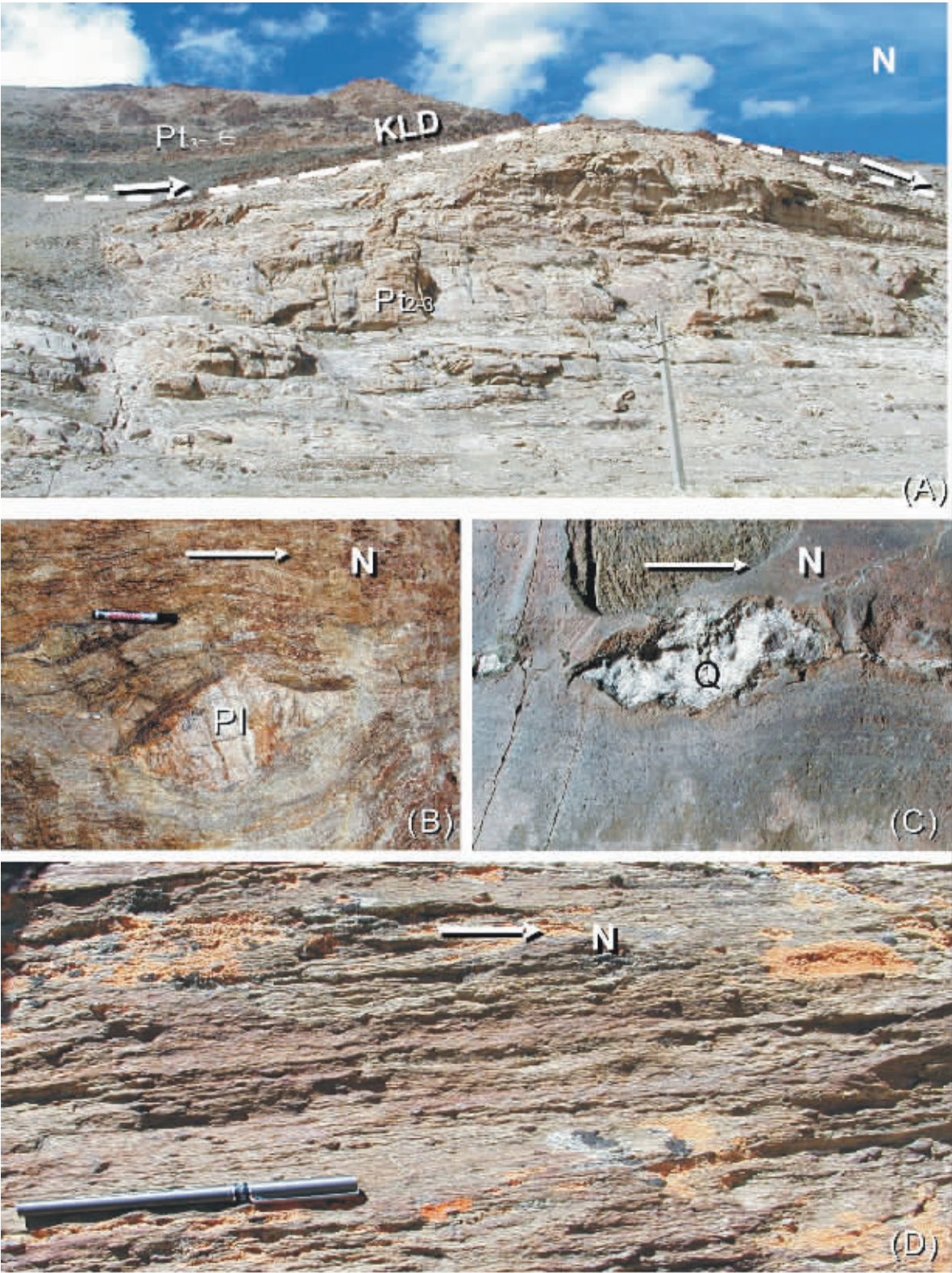


图3 康马SN 向韧性拆离构造带变形构造野外照片

Fig.3 Field photo showing deformation structure in the N-S-trending Kangmar ductile detachment
(A):KLD—康马-拉轨岗日拆离带;Pt₂₋₃—中-晚元古代花岗片麻岩;Pt₅₋₆—新元古代-寒武纪变质岩系;
(B)、(C)、(D):Pl—斜长石斑晶,Q—石英脉

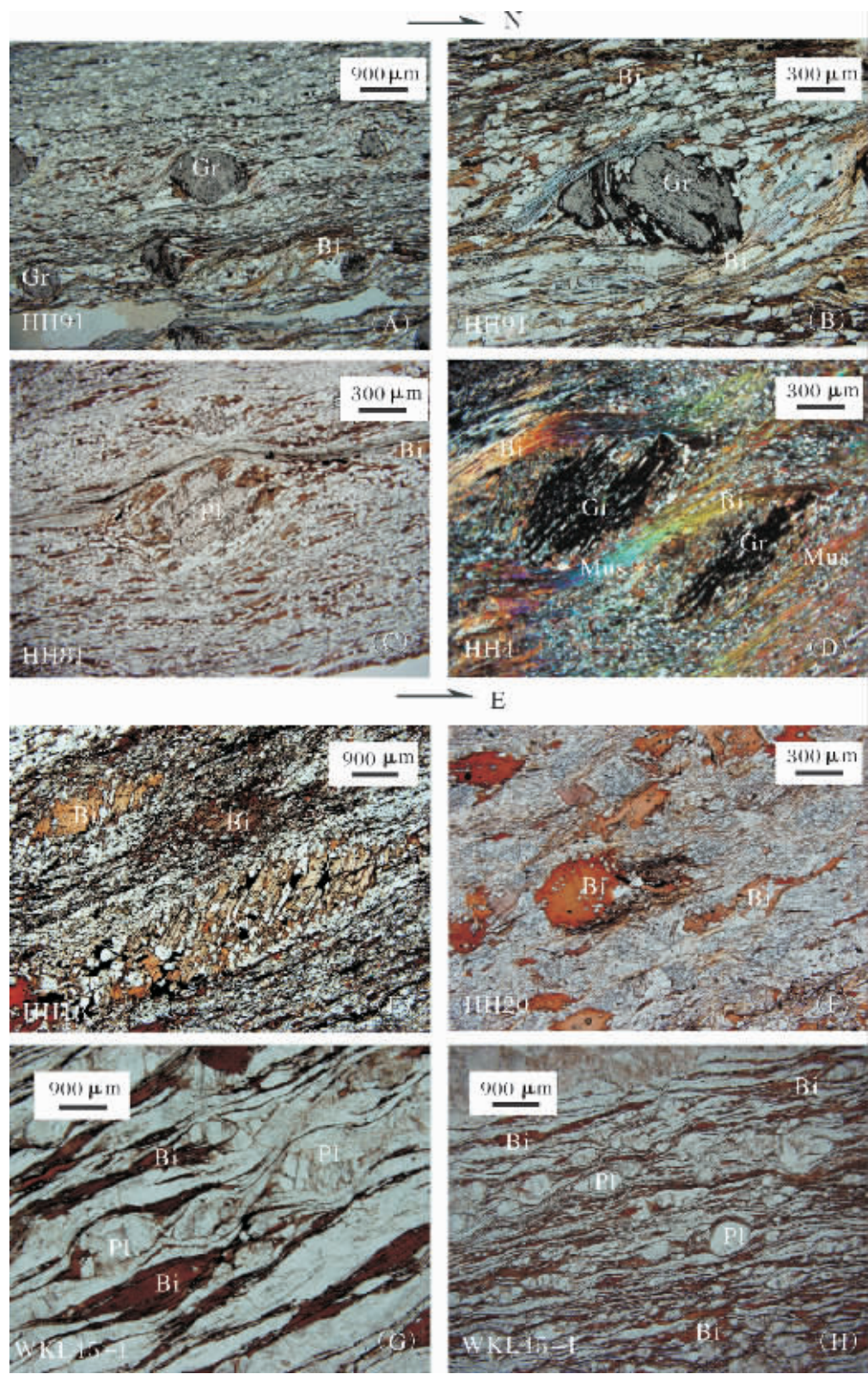


图4 喜马拉雅增生地体中NS向和EW向拆离构造带的显微照片

Fig.4 Photomicrograph showing N-S- and E-W-trending detachments in the Himalaya accretionary terrane
(A)、(B)、(C)、(D)—康马SN向拆离构造带的显微照片,显示自S而N的剪切应变;(E)、(F)、(G)、(H)—亚东EW向拆离构造带的显微照片,显示自W往E的剪切应变;Gr—石榴子石;Bi—黑云母;Mus—白云母;Pl—斜长石

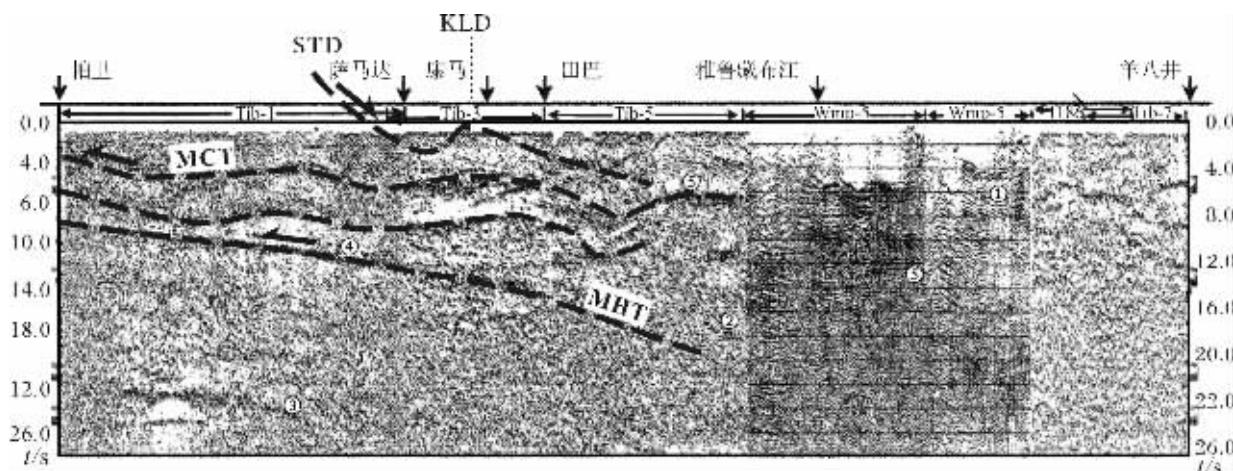


图6 穿越喜马拉雅的地震反射剖面解释图(原始资料据赵文津等,2001)^[36]

Fig.6 Interpretation of the seismic reflection profile across the Himalayas

MCT—主中央逆断层;MHT—主喜马拉雅冲断层(深部);STD—藏南拆离断层;KLD—康马-拉轨岗日拆离断层

与高喜马拉雅亚地体(GHM)之间的边界,是一条发生在中-新元古代变质基底(下板片)和盖层(上板片)之间的一条规模巨大的向北缓倾并具有自南向北滑移的拆离构造带^[5,16]。笔者观测了亚东帕里—聂拉木—吉隆镇以北地区,STD之下为高喜马拉雅角闪岩相—绿片岩相的富铝质片麻岩系,其顶部约2 km厚的岩层强烈剪切应变和糜棱岩化,卷入拆离构造带中;拆离构造带之上的盖层显示出自下而上由角闪岩相→绿片岩相→低绿片岩相→未变质的递进变质和由强剪切变形→弱剪切变形的递进应变的演化规律,以及由于拆离作用盖层厚度明显减薄甚至尖灭。研究表明,STD中段450 km的范围内,拆离带上部盖层岩片的底部均出露厚度仅几十米的新元古代—早寒武世强烈糜棱岩化的石榴子石云母片岩和二云石英片岩,其上寒武系—奥陶系为低绿片岩相(含有绿泥石、绿帘石和绢云母等矿物)的千枚岩、石英变质砂岩、钙质片岩、石英岩和大理岩,在平面上呈透镜状,厚度0~300 m。

上板片的上部为厚度不等(几十到几百米)的未变质的泥盆纪石英砂岩—砂页岩—灰岩、石炭纪—二叠纪陆缘碎屑岩夹砾板岩、三叠纪石英砂岩夹细砾岩和侏罗纪砂岩—粉砂岩。在上板片的新元古界—下寒武统、上寒武统—奥陶系、泥盆系—石炭二叠系和三叠系盖层之间均有自下而上从韧性—切脆性—脆性递变的次级平行拆离断裂系间隔。STD东段和西段还显示高喜马拉雅结晶岩系与中生代不同地层直接接触,新元古代—古生代地层全部缺失或部分缺失。

前人已经开始注意到藏南拆离断层(STD)与康马—拉轨岗日拆离断层(KLD)之间的关系^[17,35,36]。笔者的研究进一步提出藏南拆离断层(STD)与康马—拉轨岗日拆离断层(KLD)相连接的如下证据。

(1)位于藏南拆离带(STD)和康马—拉轨岗日(KLD)拆离带以下的变质基底原岩均为富铝质沉积岩系组合,原岩年龄大约800~1800 Ma,以中新元古代为主,并共同经历了泛

非—早古生代(599~429 Ma)造山事件^[2],具有共同的变形和变质演化历史,表明它们为喜马拉雅地体的统一基底。

(2)藏南和康马—拉轨岗日拆离断层带均由韧性—切脆性—脆性拆离断裂系组成,主拆离带岩石强烈糜棱岩化,糜棱面理上发育相同的近SN向拉伸线理,剪切应变显示自南往北的指向。

(3)拆离断层之上均为角闪岩相—绿片岩相—低绿片岩相的震旦纪—早古生代盖层岩片,强烈的剪切应变及自上而下的铲式构造样式同样显示了自南往北的剪切指向。由于拆离作用影响,上板片中的地层明显减薄和缺失,如康马拆离断层以上震旦统一古生界的厚度减薄到只有1 km,藏南拆离断层带之上的震旦纪—早古生代盖层仅有2.5~3 km厚。康马—拉轨岗日拆离断层带中变质基底与拆离断裂带之上不同时代的盖层(新元古界—寒武系、下古生界、石炭—二叠系、二叠—三叠系、三叠系和三叠—侏罗系等接触,拆离断裂带中盖层不同程度地减薄和尖灭可能与拆离强度在纵向上的不均一性有关,这与藏南拆离带的情况相同。

(4)前人资料表明藏南拆离断裂(STD)开始活动的时间早于22 Ma^[37],中中新世和第四纪再活动^[38](Hurtado et al,未发表)。康马拆离断裂(KLD)开始活动的时间为20 Ma,二云母花岗岩和淡色花岗岩侵入体的独居石U—Th—Pb年龄为9.5~17.6 Ma^[8,31]。上述表明藏南拆离断层带(STD)与康马拆离断层带(KLD)形成时代基本相当。由此,康马拆离断层带(KLD)与藏南拆离断层带(STD)实为同一条拆离断层带。

(5)藏南/康马—拉轨岗日拆离带连接的深部证据。康马拆离断层带(KLD)与藏南拆离断层带(STD)为同一条拆离断层带,那么康马—拉轨岗日穹隆带是如何形成的?中美合作进行的INDEPTH计划所获得的横穿拉萨地体和喜马拉雅地体的羊八井—帕里(INDEPTH—II)地震反射剖面揭示MCT和STD界面向北缓倾,延伸于特提斯—喜马拉雅亚地体之下,

2个界面均在康马穹隆的下部拱起,并继续往北延至雅鲁藏布江缝合带附近,表明康马拆离断层带(KLD)与藏南拆离断层带(STD)在深部连接(图6)^[33]。由于康马—拉轨岗日拆离带的穹隆核部均有淡色花岗岩体的侵位(9.5~17.6 Ma)^[8,31],表明康马—拉轨岗日穹隆带的形成与深部STD和MCT界面的拱起及花岗岩的侵入有关。地震反射剖面还揭示喜马拉雅地体之下的深部逆冲断裂(MHT)向北以缓倾角插入冈底斯地体之下,它的活动可能是壳下局部熔融物质的上涌形成花岗岩体的原因。

3.3 高喜马拉雅亚地体北部的EW向韧性拉伸变形构造

在高喜马拉雅(GHM)亚地体中主要发育以聂拉木群片麻岩系为主的印度次大陆变质基底,在东段亚东一带变质基底之上出露寒武纪—奥陶纪浅变质岩系组成的盖层,构成向形构造。新的变形构造研究厘定了高喜马拉雅单元(中国境内)中反映现代喜马拉雅变形特征的3种韧性变形样式:①自北而南的韧性逆冲剪切变形构造;②自南而北的韧性正滑变形构造;③EW向韧性拉伸变形构造。特别是EW向韧性拉伸变形构造的发现为讨论喜马拉雅造山机制提供了新的思考。

沿高喜马拉雅亚地体北部普兰—吉隆—聂拉木—亚东长约800 km一带,在变质基底与盖层中普遍发育以EW向拉伸线理为特征的面形韧性拆离构造,笔者称其为高喜马拉雅(普兰—亚东)东西向拆离带(GHD),证据如下。

(1)高喜马拉雅(普兰—亚东)东西向拆离带(GHD)的微构造特征

西部普兰地区:普兰纳木那尼峰下的聂拉木群为由含石榴子石斜长角闪片麻岩、硅线石榴黑云斜长片麻岩、长英质片麻岩和大理岩等组成的变质岩系,普遍糜棱岩化,糜棱面理近水平,发育近EW向拉伸线理,显示了角闪石定向排列及长英质脉布丁的微构造特征。XZ面定向薄片上的S/C构造、“σ”和“δ”型长石碎斑体系、不对称云母鱼、拖曳褶皱和多米诺骨牌构造等均显示自西往东的剪切指向(图7)。

中部吉隆和聂拉木地区:珠穆朗玛峰以西的吉隆和聂拉木地区以硅线石榴黑云斜长片麻岩为主的变质岩系中,均发现EW向韧性伸展变形,在向北缓倾的面理上发育EW向水平拉伸线理,剪切应变指示自西向东的滑移(图7)。

东部亚东地区:在亚东地区的震旦纪—寒武纪盖层与前震旦纪变质基底之间存在一条具有EW向拉伸线理的面形韧性剪切带,厚度约1 km,韧性剪切带呈向形构造样式产出,表明韧性剪切带又经历了后期南北向挤压作用(图7)。面形韧性剪切带下部前震旦纪变质岩系中,根据斜长角闪岩的透镜体的雁行状排列、不对称长英质脉体的布丁及不对称褶皱等剪切应变特征,判断剪切指向为自西往东;面形韧性剪切带上部角闪岩相—绿片岩相的震旦纪—寒武纪沉积盖层强烈变形,与变质基底的变形具有连续性、递进性,普遍发育EW向拉伸线理,出现近平卧不对称协调褶皱系列,根据褶皱轴面的倾伏、石榴子石旋转、S/C构造和不对称布丁化石英脉的微构造特征,确定剪切指向自W往E(图8、图4-B)。

(2)高喜马拉雅(普兰—亚东)东西向拆离带石英组构的EBSD测量

选择普兰地区变质基底糜棱岩化花岗片麻岩(HH45-4、HH45-5)和亚东地区盖层的石英榴闪岩(HH16-1、HH17)、黑云母变质砂岩(HH22)共5个样品,获得花岗片麻岩中石英颗粒的中高温(450~650℃)(10i0)<a>、(10i1)<a>滑移系和低温(<350℃)的(0001)<a>滑移系的EBSD组构图,无论是卷入剪切带的基底还是盖层的强剪切变形岩石均显示了自西往东的运动指向(图5-B)。

3.4 高喜马拉雅中EW向伸展构造与NS向逆冲构造的转换关系

在聂拉木南樟木海关一带的基底变质岩系中发育近EW走向N倾的渗透性面理,倾角25~40°,面理上发育近水平的EW向拉伸线理,剪切应变显示自西向东。自北而南可见EW

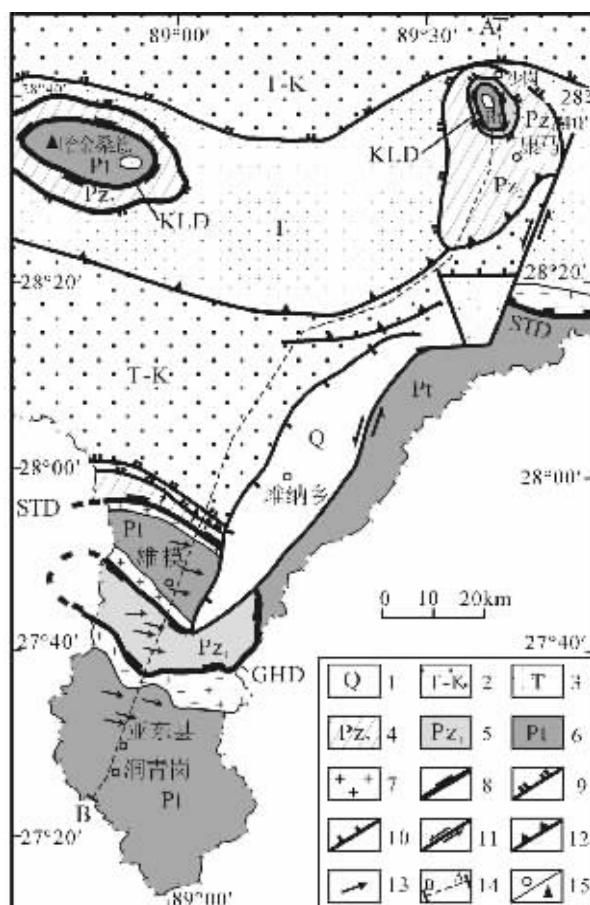


图7 亚东—康马地区构造图

(由丁孝忠提供的新编亚东1:25万地质图作为基础背景而编制)

Fig.7. Tectonic map of the Yadong-Kangmar area
1—第四纪裂谷盆地;2—三叠纪—白垩纪地层;3—三叠纪地层;
4—晚古生代地层;5—早古生代浅变质岩系;6—中新元古代
变质基底;7—花岗岩;8—拆离断层主界面;9—拆离断层;
10—正断层;11—走滑断层;12—逆冲断层;
13—拉伸线理及剪切指向;14—剖面线;15—地名及山峰

向拉伸线理在面上逐渐由水平变为向西斜倾,并且由缓倾渐变为陡倾($W<35^{\circ}\rightarrow W<63^{\circ}$),剪切应变由自西向东的运动指向逐渐变为自北而南的逆冲运动指向,由近水平的向东滑移的构造样式逐渐转为右行逆冲和逆冲的应变样式。

在亚东和吉隆镇南部变质基底中也发现与聂拉木南樟木海关一带相同的2组拉伸线理方向(NS和EW向)转换的情况,过渡区域的剪切应变指示了右行逆冲的运动指向。

3.5 喜马拉雅事件年龄

主中冲断裂(MCT)中淡色花岗岩的角闪石 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 测试和U-Pb定年表明MCT形成早于23~20 Ma^[37,39],但它在晚中—上新世还继续活动^[8],并显示了全新世活动的证据(Hodges et al,未发表)。藏南拆离断裂(STD)开始活动的时间也早于22 Ma^[37],中中新世和第四纪再活动^[38](Hurtado et al,未发表)。上述表明制约高喜马拉雅亚体的主中央冲断裂(MCT)和藏南拆离断裂(STD)几乎是同时产生和活动的,高喜马拉雅崛起的机制是“向上的挤出机制”^[14,40]。伴随挤出机制产生的大量淡色花岗岩的U-Th-Pb年龄为22~23 Ma^[37,41]到12~13 Ma^[42],在东西构造结获得最年轻的淡色

花岗岩的年龄($<4\text{ Ma}$)^[43,44]。

本研究通过亚东硅线石榴黑云斜长片麻岩样品(HH-32)中3个变质锆石及变质增生锆石($\text{Th}/\text{U}=0.01\sim0.03$)所测得的年龄($27\text{ Ma}\pm1\text{ Ma}$ 、 $19\text{ Ma}\pm14\text{ Ma}$ 、 $12\text{ Ma}\pm5\text{ Ma}$)为一致年龄,加权平均值 $19.3\text{ Ma}\pm6.7\text{ Ma}$;聂拉木地区3颗变质锆石($\text{Th}/\text{U}<0.1$)所测的年龄($20\text{ Ma}\pm0.6\text{ Ma}$ 、 $19\text{ Ma}\pm0.5\text{ Ma}$ 、 $19\text{ Ma}\pm0.5\text{ Ma}$)为一致年龄,平均值为 $19.29\text{ Ma}\pm0.63\text{ Ma}$ ^[32](表1)。新的SHRIMP测年数据结果代表了喜马拉雅事件的记录,与前人大量研究结果一致。

4 现代喜马拉雅造山机制的再讨论

研究表明,特提斯洋的影响使印度陆块上的原始喜马拉雅泛非—早古生代造山带之上覆盖了晚古生代至白垩纪的特提斯型海相沉积,69 Ma开始印度陆块向北移动,大约55 Ma印度与亚洲碰撞,使印度陆块俯冲消减和大印度陆块变成小印度陆块。新生代开始,喜马拉雅再次崛起,现代喜马拉雅造山带成为亚洲/印度陆—陆碰撞的最好例子。印度与亚洲的拼贴不仅产生了喜马拉雅山链,还形成了5 km高的青



图8 亚东地区EW 向韧性拆离构造带变形构造野外照片

Fig.8 Field photo showing deformation structure in the E-W-trending Yadong ductile detachment
(A)—GHD—高喜马拉雅拆离带;Pt₃₋₃—中—新元古代变质基底;Pt₅—ε—新元古代—寒武纪变质岩系;
B—长英质脉的旋转布丁构造显示自W向E的剪切应变;C—A型剪切平卧褶皱;D—EW向拉伸线理

藏高原、巨大范围的变形域和地壳缩短加厚。地壳的缩短主要通过喜马拉雅地体中及雅鲁藏布江缝合带以北地区的变形——逆冲断裂、褶皱和早期构造的再活化表现出来。对喜马拉雅地体变形构造的研究提出了对喜马拉雅造山机制的新思考。

4.1 主中冲断层(MCT)实质上为一条陆内转换挤压带

主中央冲断层(MCT)的主界面位于本研究区域以外的国外部分,因此缺乏对它的直观认识。但在高喜马拉雅亚地体的亚东—聂拉木—吉隆南部靠近边境一带,出现具有与横向拉伸线理斜交的右行逆冲剪切应变体系,如果这样的剪切应变体系是主中冲断层(MCT)在本研究区的反映,那么可以推测,主中冲断层带是一条具有斜向碰撞性质的相当规模的陆内转换挤压带,即具平移性质的逆冲带。古地磁记录已表明,自碰撞早期以来印度以反时针的旋转方式继续向北推进^[45,46],因此主中冲断层的运动学是印度/亚洲板块斜向碰撞的见证。

4.2 喜马拉雅SN向拆离带——藏南拆离带(STD)+康马—拉轨岗日拆离带(KLD)

已揭示了喜马拉雅地体中高喜马拉雅亚地体的北界为向北缓倾的藏南拆离断裂(STD),以SN向拉伸线理、自南往北的正向滑移及强烈韧性剪切应变为特征;南界为向北缓倾的主中央冲断裂(MCT),以SN向拉伸线理、自北往南的逆冲指向及强烈韧性剪切应变为特征,并在南缘形成一系列的逆冲叠覆岩片构造,由古老变质基底岩石组成的高喜马拉雅构造单元总体显示了南缘逆冲、北缘拆离的“挤出构造岩片”的特征^[47]。特提斯—喜马拉雅亚地体中的康马—拉轨岗日穹隆带核部由串珠状分布的古老变质岩石组成,其与高喜马拉雅亚地体的基底物质组成和形成演化时代大体一致。穹隆核部与周

边震旦纪—寒武纪石榴子石黑云母片岩、绿泥石英片岩及上部盖层之间为自南往北剪切并呈穹形的韧性拆离带。研究表明,藏南拆离断裂(STD)和主中央冲断裂(MCT)的形成年龄大致从20 Ma开始,是喜马拉雅造山事件的产物^[4-7,9],本文中获得的喜马拉雅事件记录(亚东27~12 Ma,聂拉木20~19 Ma)也证明了这一点。研究提出,康马—拉轨岗日拆离带(KLD)和藏南拆离带(STD)为位于高喜马拉雅亚地体后缘(北缘)的同一条伸展式断层,向北延伸于特提斯—喜马拉雅亚地体之下,推测南北延伸达200 km,是一条巨型拆离带。它的规模已远远超出前人的认识范围。

4.3 高喜马拉雅EW向拉伸拆离构造

高喜马拉雅EW向拉伸拆离构造首先在西段被发现。西喜马拉雅尼泊尔西北部Gurla Mandhata—Humla剪切带为一

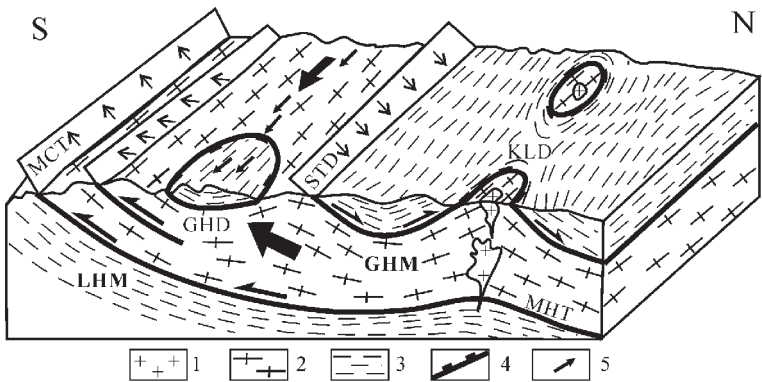


图9 高喜马拉雅造山机制模式图

Fig.9 Model showing the orogenic mechanism of the Greater Himalaya

1—浅色花岗岩;2—中新元古代变质岩系;3—早古生代浅变质岩系;
4—拆离断层主界面;5—拉伸线理;STD—藏南拆离断层;MCT—主中央
冲断层;GHD—高喜马拉雅拆离断层;KLD—康马—拉轨岗日拆离断层;
GHM—高喜马拉雅亚地体;LHM—低喜马拉雅亚地体

表1 亚东(HH32)和聂拉木(HH72)片麻岩中锆石SHRIMP U-Pb定年数据

Table 1 SHRIMP U-Pb dating data for zircons from the Yadong (sample HH32) and Nyalam (sample HH72) gneisses

样品号	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb/10 ⁻⁶	Th/U	²³⁵ U/ ²⁰⁷ Pb *	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb *	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U年龄/Ma
HH32-18.1	375	9	1.35	0.03	15.8479±1.3154	237.90±9.2780	27±1
HH32-3.2	40	1	0.30	0.03		342.00±249.66	19±14
HH32-6.1	109	1	0.38	0.01		546.00±212.94	12±5
HH72-22.1	4031	7	10.8	0.00	78.7402±16.5354	328.10±9.5149	20±0.6
HH72-13.1	9171	30	23.8	0.00	60.9756±5.2439	335.00±9.3800	19±0.5
HH72-19.1	5795	12	14.9	0.00	56.1798±4.6067	337.60±9.4528	19±0.5
HH72-23.1	18403	52	43.2	0.00	49.4315±1.8290	366.50±9.8955	18±0.5

条缓倾角(20°)的拆离带,厚度2 m,拉伸线理近EW向,剪切指向自E往W。石榴子石中独居石的Th-Pb测年结果显示石榴子石生长在16~10 Ma期间。本研究揭示高喜马拉雅中东段(普兰—吉隆—聂拉木—亚东长约800 km一线)发育大面积自W往E的拉伸拆离构造,与西段遥相呼应,高喜马拉雅EW向拉伸拆离构造成为现代喜马拉雅构造变形的新标记。

4.4 “垂向挤出”和“侧向水平挤出”机制的耦合

在高喜马拉雅亚地体中东段自南而北呈现相互转换的韧性构造样式:斜向逆冲→EW向伸展→斜向伸展→SN向伸展。前缘斜向逆冲与MCT有关,后缘斜向伸展与SDT有关,说明20 Ma以来高喜马拉雅变质体的隆升受到斜向向上挤出机制的制约。根据EW向拉伸构造与NS向斜向逆冲、斜向伸展的渐变和转换关系,以及整个高喜马拉雅亚地体西段自东往西和中东段自西往东近水平滑移的运动学特征,推测其反映高喜马拉雅中东段物质向东、西段物质向西逃逸的特征。因此,EW向拉伸构造是印度/亚洲岩石圈碰撞的近NS向挤压背景下古老基底岩石从深部斜向挤出并导致近水平滑移的造山机制的综合效应(图9)。

4.5 喜马拉雅缩短量的再重塑

对喜马拉雅地壳缩短量已做了许多工作,曾推测MCT与MFT之间的缩短量为414~550 km^[47],西尼泊尔低喜马拉雅MBT和MCT之间的缩短量为228 km^[48,49],东尼泊尔低喜马拉雅和次喜马拉雅之间缩短70 km,MCT及藏南地区缩短150~170 km等。因而,进一步又提出喜马拉雅地体两翼的缩短为465~808 km^[1],MFT和MMT的总缩短量620 km^[50,51]。笔者认为,高喜马拉雅的实际变形包括了“原始喜马拉雅”变形和“现代喜马拉雅”变形两部分,新生代变形又包含了挤压、走滑和伸展机制造成的变形,因此实际的“现代”缩短量应该比上述估算的小。

致谢:SHRIMP年龄测试在中国地质科学院地质研究所同位素实验室进行,EBSD组构测量在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室进行,在成文中与肖序常院士和赵文津院士进行了有益的讨论,文中图件由张晓卫绘制,参考文献由蔡志慧、唐哲民协助整理,在此一并感谢。

参考文献:

- [1]Dewey J F, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the India/Eurasia Collision zone [J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1989,82:717-734.
- [2]Gansser A. *Geology of the Himalayas*[M]. London, Wiley Interscience, 1964:289.
- [3]Le Fort P, Debon F, Sonet J. The Lower Paleozoic “Lesser Himalayan” granitic belt: Emphasis on the Simchar pluton of central Nepal. in: Shams F A ed. *Granites of the Himalaya arakoram and Hindu Kush*[C]. Lahore, Institute of Geology, Punjab University, 1983,235-256.
- [4]Burg J P, Chen G M. Tectonics and structural formation of southern Tibet, China[J]. *Nature*, 1984,311:219-223.

- [5]Burchfiel B C, Chen Z, Hodges K V, et al. The South Tibetan Detachment System, Himalayan orogen: extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt[J]. *Geol. Soc. Am. Spec.Pap.*, 1992,269:1-41.
- [6]Brookfield M E. The Himalayan passive margin from Precambrian to Cretaceous[J]. *Sedimentary Geol.*, 1993,84:1-35.
- [7]Le Fort P. Evolution of the Himalaya[A]. In: A Yin, T M Harrison, *The Tectonics of Asia*[C]. New York: Cambridge Univ. Press, 1996:95-106.
- [8]Harrison T M, Ryerson F J, LeFort P, et al. A late Miocene-Pliocene progin for the central Himalayan inverted metamorphism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997,146:E1-E7.
- [9]Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Rev.Earth Planet. Sci*, 2000,28:211-80.
- [10]Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982,10: 611-616.
- [11]Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988,93 (12):1508-1517.
- [12]Avouac J-P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993,20:895-898.
- [13]Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Scieces*, 2001, 294: 1671-1677.
- [14]Chemenda A I, Mattauer M, Bokun A N. Continental subduction and a mechanism for exhumation of high-pressure metamorphic rocks: New modeling and field data from Oman [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 143:173-182.
- [15]Burchfiel B C, Royden, L H. North-south extension within the convergent Himalaya region[J]. *Geology*, 1985,13:679-682.
- [16]崔军文,朱红,武长得,等.亚东-格尔木GGT,青藏高原岩石圈变形及其动力学[M].北京:地质出版社,1992,1-164.
- [17]崔军文.喜马拉雅碰撞带的构造演化[J].*地质学报*,1997,71(2): 105-112.
- [18]Chen Z, Liu Y, Hodges K V, et al. The Kangmar dome: A metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet)[J]. *Science*, 1990,250:1552-1556.
- [19]刘文灿,梁定益,王克友,等.藏南康马地区奥陶系的发现及其地质意义[J].*地学前缘*,2002,9(4):247-248.
- [20]周志广,刘文灿,梁定益.藏南康马奥陶系及其底砾岩的发现并初论喜马拉雅沉积盖层与统一变质基底的关系[J].*地质通报*,2004, 23(7):655-663.
- [21]Krummenacher D. Determination d'age isotopique faite sur quelques roches de L'Himalaya du Nepal par la methode K/Ar [J]. *Bull. Suisse, Min.Petr.*,1961, 41/2:273.
- [22]Xu R H, Sharer U, Allegre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa Block (Tibet): An U-Pb geochronological study[J]. *J.Geol.*, 1985,93:42-57.

- [23] Acharyya. Stratigraphy and tectonic features of the Eastern Himalayas[A]. In: Saklani P S ed. Tectonic geology of the Himalaya[C]. Today and Tomorrow's Pub., 1997. 243–268.
- [24] Thakur V C. Tectonics of the Central crystallines of western Himalaya[J]. Tectonophysics, 1980, 62: 141–154.
- [25] Gehrels G E, Decelles P G, Martin A, et al. Initiation of the Himalayan orogen as an Early Paleozoic Thin-skinned Thrust belt[J]. GSA Today, 2003. 13: 4–9.
- [26] Pognante U, Spencer D A. First record of eclogites from the High Himalayan belt, Kaghan valley (northern Pakistan)[J]. Eur. J. Mineral., 1991, 3/3: 613–618.
- [27] Guillot S, Mascle G, Lardeaux J M, et al. A new discovery of eclogites from the Himalaya, Tso Moriri dome unit (northwestern India)[J]. Mitteilungen des Geologischen Institut ETH Zürich und Universität Zürich, Neue Folge, 1995, 298: 84–87.
- [28] Guillot S, de Sigoyer J, Lardeaux J M, et al. Eclogitic metasediments from the Tso Moriri area (Ladakh, Himalaya): Evidence for continental subduction during India–Asia convergence [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1997, 128: 197–212.
- [29] Le Fort P, Guillot S, Pecher A. HP metamorphic belt along the Indus suture zone of NW Himalaya: New discoveries and significance[J]. C.R. Acad. Sci. Paris, 1997, 325: 773–778.
- [30] Tonarini S, Villa I, Oberli M, et al. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalaya: Implications for India–Eurasia collision[J]. Terra Nova, 1993, 5: 13–20.
- [31] Schärer U, Xu R, Allegre C. U–(Th)–Pb systematics and ages of Himalayan leucogranites, south Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 77: 35–48.
- [32] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非–早古生代造山事件年龄记录[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 1–12.
- [33] Zhao W J, Nelson K D, Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. Nature, 1993, 366: 557–559.
- [34] Mainprice D, Boucher T–L, Blumenfeld P, et al. Dominant c slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperature[J]. Geology, 1986, 14: 819–822.
- [35] 李德威, 刘德民, 廖群安, 等. 藏南萨迦拉纳岗日变质核杂岩的厘定及其成因[J]. 地质通报, 2003, 22(5): 303–307.
- [36] 赵文津及INDEPTH项目组著. 喜马拉雅山及雅鲁藏布江缝合带深部结构与构造研究[M]. 北京: 地质出版社. 2001. 369.
- [37] Hodges K V, Parrish R R, Searle M P. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas[J]. Tectonics, 1996, 15: 1264–1291.
- [38] Hodges K V. The thermodynamics of Himalayan orogenesis A. In: Treloar P. J, O'Brien P eds. What drives metamorphism and metamorphic reactions[C]. Geological Society, 1998. 270.
- [39] Hubbard M S. Thermobarometric constraints on the thermal history of the Main Central thrust zone and Tibetan slab, eastern Nepal Himalaya[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1989, 7: 19–30.
- [40] Chemenda A I, Burg P, Mattauer M. 2000, Evolutionary model of the Himalaya–Tibet system: geopoem based on new modeling, geological and geophysical data [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2000, 174: 397–409.
- [41] Harrison T M, Mahon K I, Guillot S, et al. New constraints on the age of the Manaslu leucogranite: Evidence for episodic tectonic denudation in the central Himalaya: Discussion and reply[J]. Geology, 1995, 23: 478–480.
- [42] Wu C L, Nelson K D, Wortman G, et al. Yadong cross structure and South Tibetan detachment in the east central Himalaya (89°–90°E)[J]. Tectonics, 1998, 92: 28–45.
- [43] Zeitler P K, Chamberlain C P, Smith H A. Synchronous anatexis, metamorphism, and rapid denudation at Nanga Parbat (Pakistan Himalaya)[J]. Geology, 1993, 21: 347–350.
- [44] Burg J P, Nievergelt P, Seward D, et al. The Namche Barwa syntaxis: Evidence for exhumation related to compressional crustal folding[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1998, 16: 239–252.
- [45] Patriat P, Achache J. India–Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanisms of plates [J]. Nature, 1984, 311: 615–621.
- [46] Klootwijk C T, Gee J S, Peirce J W, et al. An early India–Asia contact: Paleomagnetic constraints from Ninetyeast Ridge, ODP Leg 121[J]. Geology, 1992, 20: 395–398.
- [47] Srivastava P, Mitra G. Thrust geometries and deep structure of the outer and lesser Himalaya, Kumaun and Garhwal (India): Implications for evolution of the Himalayan fold and thrust belt [J]. Tectonics, 1994, 13: 89–109.
- [48] DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, et al. Eocene–early Miocene foreland basin development and the history of Himalayan thrusting, Western and central Nepal [J]. Tectonics, 1998, 17: 741–765.
- [49] DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, et al. Eocene–early Miocene foreland deposits, erosional unroofing, and the kinematic history of the Himalayan fold–thrust belt, western Nepal [J]. Geology Society of America Bulletin, 1998, 110: 2–21.
- [50] Lyon–caen H, Molnar P. Constraints on the structure of the Himalaya from an analysis of gravity anomalies and a flexural model of the lithosphere [J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88: 8171–8191.
- [51] Molnar P. Structure and tectonics of the Himalaya: Constraints and implications of geophysical data[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1984, 12: 489–518.