

高喜马拉雅的三维挤出模式

许志琴¹ 王 勤² 曾令森¹ 梁凤华¹
李化启¹ 戚学祥¹ 蔡志慧¹ 李忠海¹ 曹 汇¹

(1.大陆构造与动力学国家重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037;
2.南京大学地学系,江苏 南京 210093)

摘要:作为喜马拉雅造山带变质核的高喜马拉雅杂岩带,是以高级变质岩石、普遍的深熔反应以及高温韧性变形为主要特征的热碰撞造山带。在高喜马拉雅平行造山的韧性伸展构造发现的基础上,建立高喜马拉雅挤出的 3-D 构造模式,并提出了挤出的动力学过程:(1)造成高喜马拉雅中弱和热物质产生的局部熔融阶段(46~35 Ma), (2)平行造山的韧性伸展和重力裂陷阶段(28~26 Ma 开始), (3)韧性逆冲型剪切带形成阶段(>626~23 Ma), (4) MCT 和 STD 的形成造成的高喜马拉雅挤出阶段(23~17 Ma)。

关键词:高喜马拉雅杂岩;3-D 挤出模式;热碰撞造山

中图分类号:P54 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)03-0671-10

1 前 言

印度/亚洲碰撞是新生代以来地球上发生的最壮观的地质事件,它导致喜马拉雅造山崛起、青藏高原的隆升和大量物质的向东和南东逃逸,并构筑成青藏高原奇特的构造形貌景观^[1]。喜马拉雅是世界上最年轻、最雄伟的山脉,横空拔起,屹立在地球之颠。在印度大陆北缘变质基底和沉积盖层基础上构筑的喜马拉雅造山带,由“特提斯喜马拉雅”、“高喜马拉雅”、“低喜马拉雅”和“次喜马拉雅”4 个构造岩片组成,岩片之间存在“藏南拆离系”、“主中冲断层”、“主边冲断层”和“主前锋冲断层”4 条构造边界^[2~8],喜马拉雅的构架目前已初步奠定(图 1)。特别是近 20 年来“构造挤出”、“楔状挤出”、“隧道流”、“纵向伸展”、“变质活化”、“物质逃逸”和印度板块“不同时空深俯冲”等碰撞造山的理论(或论点)的推出,使全球眼光又一次聚焦喜马拉雅,成为 AGU、EGU 和 HKT 等国际会议讨论的热点,大大超越阿

尔卑斯造山带的影响。因此,喜马拉雅已成为“全球陆-陆碰撞造山带”的重要典型,是研究碰撞造山的圣地。

1.1 青藏高原研究沿革

喜马拉雅的研究始于 1851 年印度地质先驱者,著名的 Argand 在 1924 首次提出喜马拉雅碰撞造山模式,1964 年 Gansser 发表《喜马拉雅地质》专著,奠定喜马拉雅的基本构造格架,并首先提出印度大陆插入亚洲大陆之下的模式。继后,板块构造理论运用到喜马拉雅碰撞造山研究中, Dewey and Bird (1970) 和 Le Fort (1975) 提出高喜马拉雅的倒转变质和主冲断裂关系的模式; Molnar 和 Tapponnier (1975—1976) 强调了喜马拉雅碰撞作用和走滑断裂在青藏高原形成中作用;随着尼泊尔 (1951)、西 Ladakh (1975)、中国 (1980)、不丹 (1984) 和东 Ladakh (1994) 等国家(地区)的政治对外开放,数百名来自世界各地的地质学家对喜马拉雅—青藏高原进行考察。

收稿日期:2013-05-12;改回日期:2013-05-19

基金项目:国家自然科学基金委创新群体项目(40921001)和中国地质调查局项目(1212010818094)资助。

作者简介:许志琴,女,1941 年生,留法博士,中国科学院院士,从事大地构造及构造地质学研究;E-mail: xzq@ccsd.org.cn。

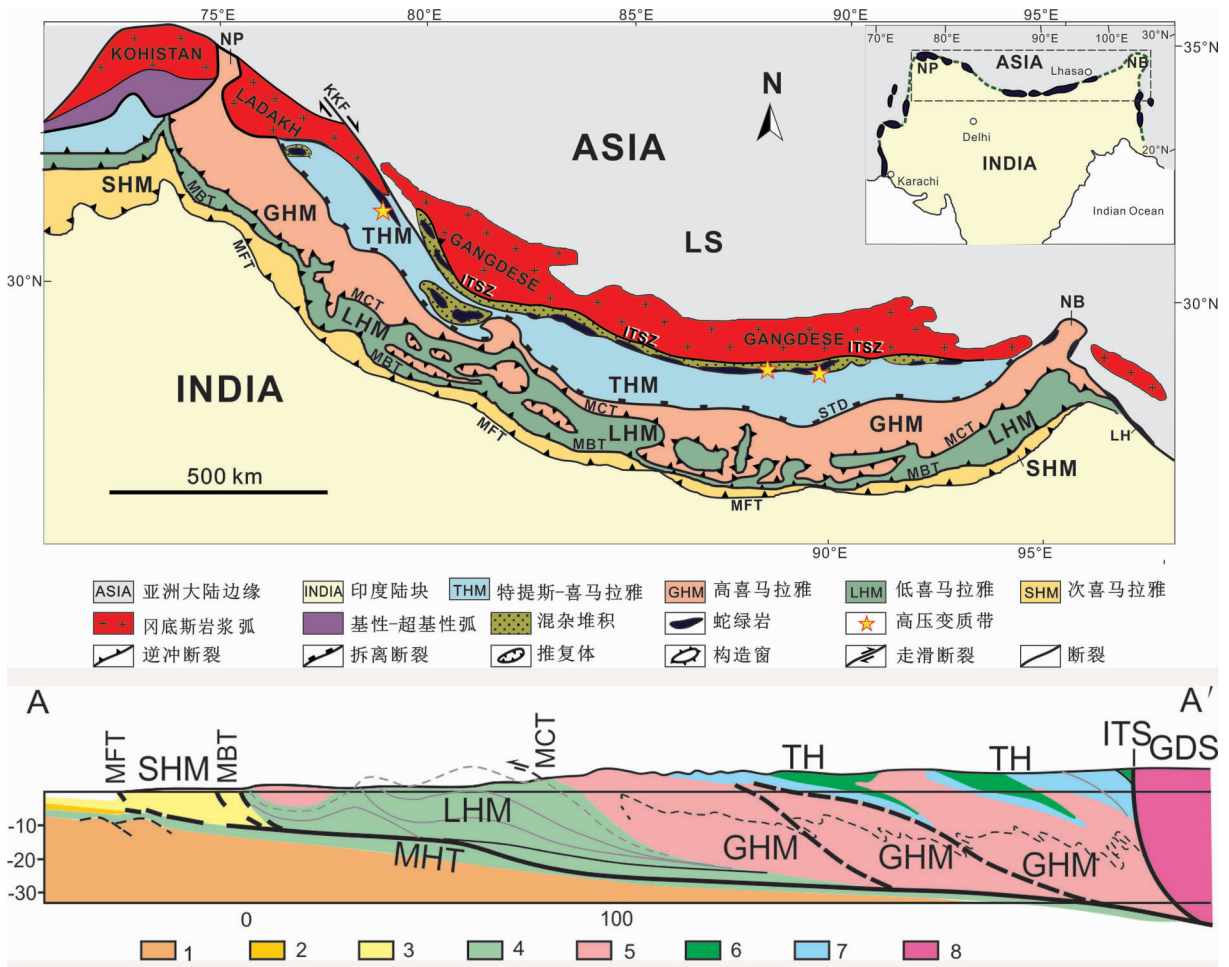


图 1 喜马拉雅造山带构造图(上)和构造剖面图(下)

Fig.1 Map showing tectonic framework and cross-section of the Himalayan orogen

1—印度陆块基底 (Indian basement); 2—西瓦利克磨拉石 (Siwalik molasse); 3—次喜马拉雅 (SHM); 4—低喜马拉雅 (LHM); 5—高喜马拉雅结晶岩 (GHM); 6, 7—特提斯-喜马拉雅沉积岩 (TH); SHM—次喜马拉雅 (Sub-Himalaya); 8—冈底斯岛弧带 (Gangdise belt); MHT—主喜马拉雅冲断裂 (Main Himalaya thrust); MCT—主中冲断裂 (Main Central thrust); MBT—主边冲断裂 (Main boundary thrust); MFT—主前锋冲断裂 (Main front thrust); STD—藏南拆离系 (South Tibet Detachment) [9-14]

自 20 世纪 80 年以来,喜马拉雅“中法喜马拉雅的合作研究”(1980—1984)、“中法青藏高原合作研究”(1995—2005)以及中美 INDEPTH 计划先后实施;中国地质调查局组织新一轮的青藏高原(包括喜马拉雅)1:20 万地质填图;90 年代开始,大陆动力学的新观念引入青藏高原研究中,国家自然科学基金、中国科学院、国土资源部设立大批青藏高原的研究项目,使青藏高原的基本构架得以建立和不断完善,亚洲碰撞和青藏高原深部结构揭示方面也取得长足进展,但是直接涉及喜马拉雅的研究仍然较少。

在青藏高原 1:25 万地质调查基础上,潘桂堂等[15-16]提出多洋岛、多岛弧、多陆块的青藏高原大地

构造构架,许志琴等(2007)提出青藏高原是由始、古、新特提斯复合地体和造山带拼贴而成的“造山的高原”的论点。在喜马拉雅造山带研究中, Yin An 等(2006)综述了喜马拉雅中段[7,17-20]、西段[21-24]和东段[25-27]的研究成果,提供了喜马拉雅完整构造体系和演化的论述。

喜马拉雅主带及邻区的地壳和地幔层析剖面 [28-30] 以及 INDEPTH-II 和 III 的远震层析资料 [31]、INDEPTH-II 和中-美 PASSCAL 的探测资料 [32](图 3)均揭示高速异常体组成的印度岩石圈板片以低角度往北长距离插入青藏高原之下、然后倾角逐渐变大,在北纬 33°附近(即班公湖—怒江缝合带位置)

变为直立陡插,且往南翻转,俯冲达800~1000 km深度。在地壳下部存在主喜马拉雅逆冲断裂带(MHT)以及喜马拉雅西构造结印度和亚洲岩石圈板片的双向陡俯冲^[33]。特别是喜马拉雅造山带下部主滑脱面(MHD)或(MHT)的揭示^[34],使人们将MHD与上部构造的联系以及与高喜马拉雅韧性挤出的关系作为重要的思考和研究的内容。

1.2 高喜马拉雅为全球“热碰撞造山”的典型

世界上不同的陆-陆造山带的热结构有明显差异,可以划分为热碰撞造山和冷碰撞造山的不同类型^[35-38]。前者显示了在碰撞造山带中出露的岩石曾经形成在深部中-下地壳的“构造-变质-岩浆”热体制中,后期经历折返、隆升和冷却过程;而后者指形成在中-上地壳的浅部冷环境。

在喜马拉雅造山带中,位于主中冲断裂(MCT)上盘的高喜马拉雅岩片(GHM)厚度可达7~9 km,由元古宙的角闪岩相-麻粒岩相(甚至榴辉岩相)变质岩组成,显示一个倒置的变质相序列(下部含石榴石-十字石,中部蓝晶石-夕线石,顶部为混合岩化岩石)^[14],并被2~3 km厚上部局部熔融的花岗岩浆物质侵位。说明高喜马拉雅的变质-深熔作用与主中韧性逆冲剪切带(MCTSZ)具有耦合性。一些学者提出在高喜马拉雅中的变质、深熔和变形事件从45 km深度折返至18 km,可以从44 Ma延续至16~13 Ma^[39,40],预示一个热的、弱的、低粘度的剪切层存在于碰撞造山带中,并具有韧性挤出的特征。

人们将来自地壳中-下部而又急剧上升、广泛分布的深熔作用以及高温韧性变形为特征的高喜马拉雅称为“热碰撞造山带”,而特提斯-喜马拉雅和低喜马拉雅岩片则为“冷碰撞造山带”^[41]。喜马拉雅的热碰撞造山的证据完好保存在来自中下地壳的构造变形、变质和深熔效应的记录中,它们将提供高喜马拉雅从深部到浅部侵位和挤出机制的过程,是研究全球大陆热碰撞造山带的一个理想地区。

1.3 高喜马拉雅岩片的挤出模式

自1996年以来,喜马拉雅-青藏高原构造的一种新解释“隧道流和韧性挤出”被提出,并引起广泛的注意。这一理论是利用中-下地壳的隧道流来解释青藏高原的向外生长^[37,38,42,43],并根据夹持高喜马拉雅的藏南拆离系(STD)和主中冲断裂(MCT)形成的同时性,以及低粘度的隧道造成的韧性挤出作为基点^[36,44-47]。2004年12月在伯灵顿召开了由伦敦

地质学会主办的“大陆碰撞带中-下地壳的隧道流、挤出和折返”大会,着重讨论了喜马拉雅-西藏碰撞系新生代地壳隧道流问题。有关高喜马拉雅中地壳岩石的隧道流或韧性剪切挤出方面的证据^[17,36,48,49]以及与之相关的模型^[38,47,50-53]已经得到了充分地阐述和研究。

但是,喜马拉雅隧道流是否合适,能否普遍运用于喜马拉雅造山带和世界其他山脉,尚需要进一步研究证明。隧道流的理论也遭到许多地学家的质疑和反对,表现为另两个高喜马拉雅挤出模式——“楔状挤出”和“构造楔”的提出。“楔形挤出”的模式将高喜马拉雅看成为一个刚性的楔体^[5,39],而“构造楔”模式认为STD早期为MCT分支逆冲断裂,高喜马拉雅的前缘曾在15~20 km被剥蚀,使之呈楔形体^[54-59](图2)。

现状和发展动态分析表明,高喜马拉雅大陆动力学的研究已经步入以热碰撞造山为核心,韧性挤出机制为目标的新的研究阶段。不仅对于喜马拉雅造山带的形成和演化,而且对于全球的碰撞造山带具有示范和启迪意义。

2 平行造山带的韧性伸展与高喜马拉雅的三维挤出模式的提出

高喜马拉雅杂岩(GHC)是以位于底面的向北倾斜的主中冲断裂(MCT)和位于顶面的藏南拆离系(STD)所夹持的喜马拉雅造山带变质核,GHC的挤出是印度陆块岩石圈向北俯冲于亚洲板块之下的结果^[7,8,54,58]。很长时期以来,人们把注意力集中在垂直喜马拉雅造山带的剪切运动矢量——近南北向的拉伸线理之上,指出STD和MCT之间的中地壳岩石的向南折返发生在中新世^[54,59,60]。上述的三个模式就是建立在二维空间变形的基础上。

因此同时,平行造山带的拉伸线理在高喜马拉雅的上部被描述:包括在中喜马拉雅的聂拉木^[61]、西喜马拉雅的Gurla Mandhata^[62]、中尼泊尔^[63-64]、拉达克^[65]、Leo Pargil穹隆^[66]和Ama Drime地块^[67,68]引起注意,但是平行造山带的拉伸线理是否普遍存在、形成的时限、动力学机制以及在高喜马拉雅折返中的作用一直不得理解。

2.1 平行高喜马拉雅山脉的E-W向伸展式流动的确

沿着高喜马拉雅带从东到西(错那—亚东—聂拉木—吉隆—Manaslu(尼泊尔)—普兰)1500 km范

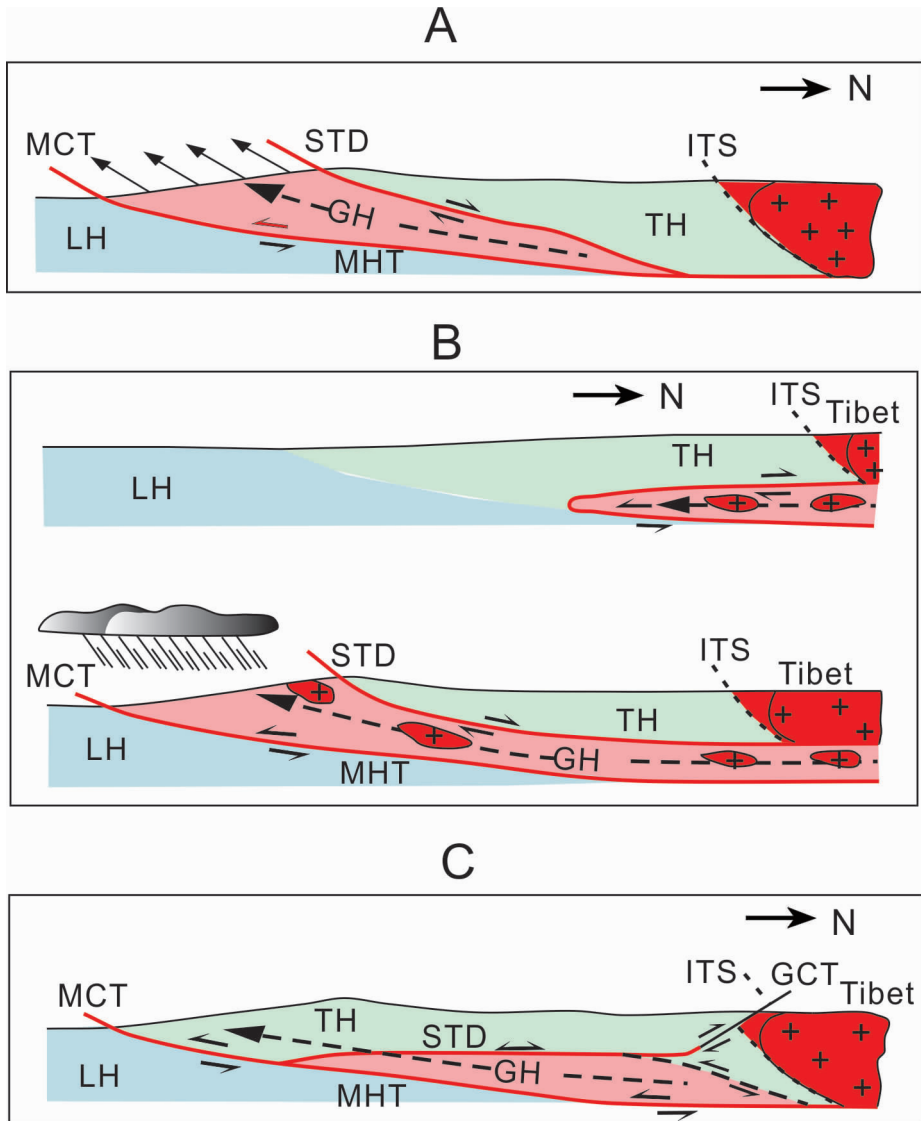


图2 高喜马拉雅杂岩的主要挤出模式图

(图例说明同图1)

A—楔状挤出模式; B—隧道流模式; C—构造楔模式

Fig.2 Major extrusion models of the GHC

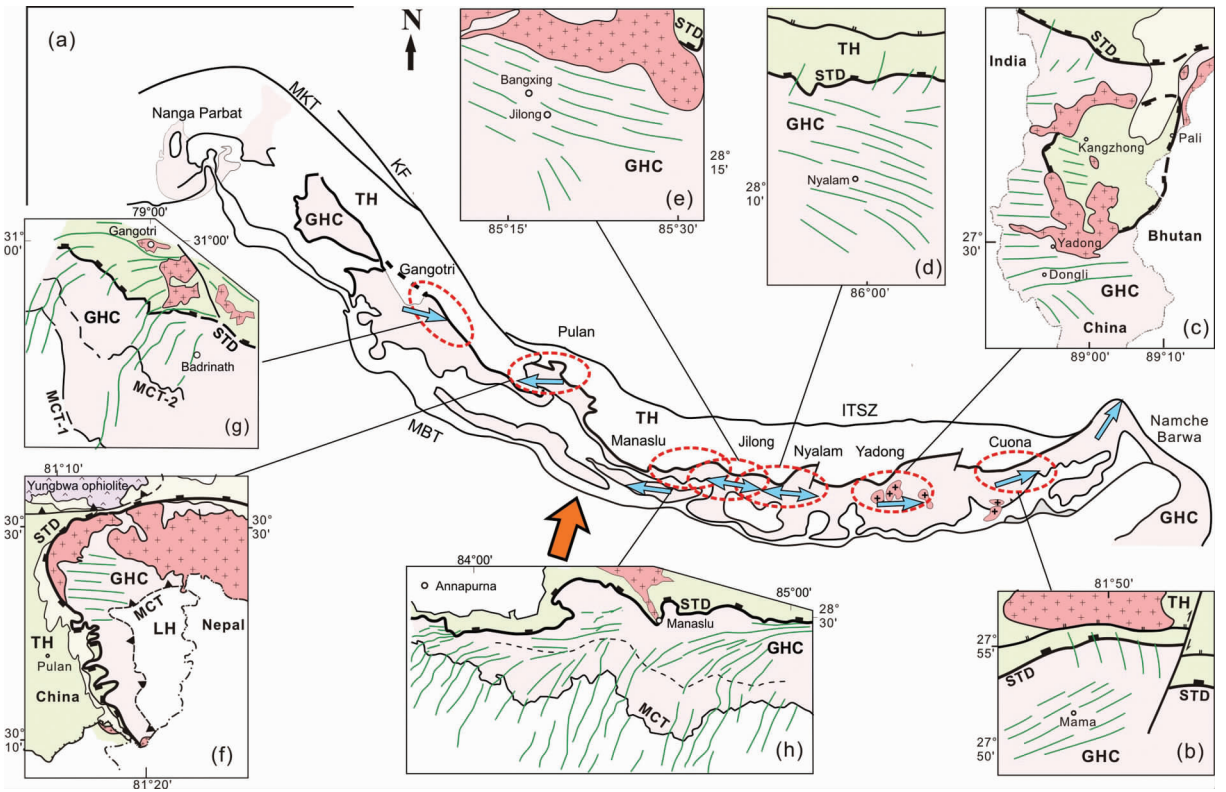
A—Wedge extrusion model; B—Channel flow model; C—Tectonic wedge model

围内,近水平的剪切带和平行山脉的渗透性拉伸线理在高喜马拉雅岩片上部广泛发现^[69,70]。野外观察、微构造分析和来自剪切带糜棱岩化片麻岩中的石英晶体优选方位的EBSD测量结果表明,近水平的剪切带具有东部(错那、亚东)物质向东流动、西部(普兰)物质向西流动以及中部(聂拉木—吉隆—尼泊尔玛纳斯鲁 Manaslu)物质向东或向西流动的“伸展式流动”规律(图3),并且根据石英普遍存在<c>高温(>650°C)滑移组构特征,说明“韧性伸展式流动”形成在15~20 km深部的高温状态。平行

高喜马拉雅的近E-W向伸展式流动的时限已经通过SHRIMP和LA-MC-ICP-MS的锆石测年确定,在东部(亚东)和吉隆(中部)的糜棱岩化片麻岩中锆石变质环带的年龄为28~26 Ma,西部(普兰)为22~15 Ma。亚东糜棱岩化片麻岩的黑云母和白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar冷却年龄为13~11 Ma^[70]。

2.2 平行高喜马拉雅山脉的物质向东流入南迦巴瓦构造结

喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造结是插入亚洲板块之下的印度大陆东犄角。南迦巴瓦构造结



b-错那地区;c-亚东地区;d-聂拉木地区;e-吉隆地区;f-普兰地区;g-Gangotri 地区;h-Manaslu 地区

图 3 高喜马拉雅杂岩中平行拉伸线理的展布图(a)

Fig.3 Stretching lineation patterns in the Great Himalaya Complex (a)

由两个单元组成:北部与西部的南迦巴瓦变质杂岩带(NBC)和多雄拉穹隆(DMD)组成,前者为高级变质的角闪岩-麻粒岩相成分;后者强烈混合岩化^[7]。雅鲁藏布大拐弯缝合带分割南迦巴瓦构造结和拉萨地体。位于南迦巴瓦构造结两侧的雅鲁藏布缝合带随着大拐弯方向转为近南北弧形方向,其左侧的米林剪切带转换成左行走滑剪切带,而右侧的墨脱剪切带转为右行走滑剪切带。米林左行走滑剪切带具有近直立的糜棱岩化面理、近水平的拉伸线理和强烈的左行走滑剪切应变特征,其南段渐变为伸展转换型(左行走滑+正滑)至伸展型(正滑)特征,并与喜马拉雅主带的藏南拆离系(STD)相连^[7]。上述研究表明,平行喜马拉雅的物质流动向东进入南迦巴瓦构造结,并转为北东和北向运动,并插入拉萨地体之下。

2.3 激发高喜马拉雅物质挤出的早期深熔作用

在特提斯-喜马拉雅单元中曾发现由高喜马拉雅前寒武纪高级变质岩石组成的变质基底,它们以穹隆形式出现,构造拉轨岗日变质穹隆带,并与浅变

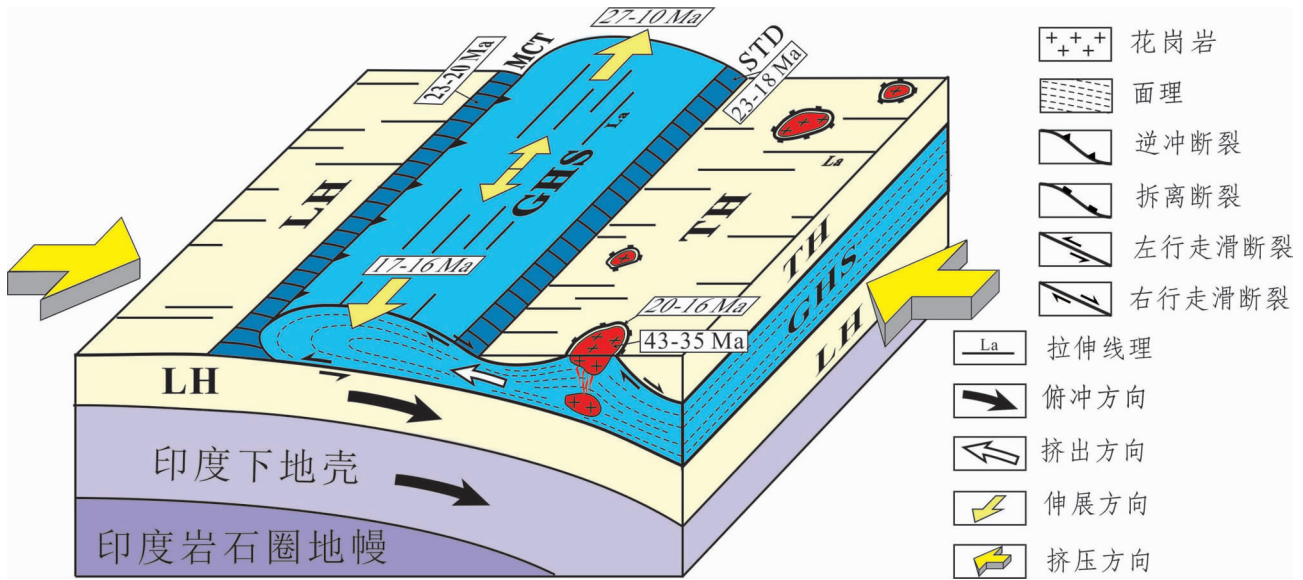
质早古生代—中生代盖层之间存在一条 20~16 Ma 形成的拆离系,推测为藏南拆离系(STD)的向北延伸。新的研究表明,在拉轨岗日变质穹隆带中发现 43~35 Ma 形成的淡色花岗岩,表明在此阶段地壳加厚和局部熔融在渐新世已经开始,并可能导致中下地壳物质的弱化和软化,以及产生高级变质作用和高温韧性变形,高喜马拉雅的挤出由此启动。

2.4 高喜马拉雅挤出的三维模式

平行喜马拉雅造山带流动的发现使高喜马拉雅的二维运动学模式发展为三维。研究说明,渐新世的局部熔融导致 GHC 中地壳中下部物质产生弱化、软化和热的效应,促进高喜马拉雅岩片开始挤出;在晚渐新世至中新世由于侧向地壳的增厚,平行造山带的重力垮塌造成平行山脉的伸展式韧性流动^[9]。中新世时产生高喜马拉雅大规模挤出(图 4)。

3 高喜马拉雅的三维挤出过程

在西尼泊尔的高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅之间的 STD 主要表现为与下滑作用有成因联系的早



THS-特提斯喜马拉雅岩片,GHS-高喜马拉雅岩片,LHS-低喜马拉雅岩片,STD-藏南拆离系,MCT-主中逆冲断裂

图4 南-北挤压作用下高喜马拉雅杂岩挤出的3-D构造模式
Fig.4 3D tectonic model of the GHC under N-S compression

古生代地层中缓倾的面理和上部侏罗纪盖层中的大型同斜褶皱,高喜马拉雅与低喜马拉雅之间MCT的上部具有宽阔的韧性逆冲域,Carosi (2010)曾提出在高喜马拉雅的下部存在一条高温的韧性逆冲剪切带(TSZ),独居石测年26 Ma代表TSZ形成的时代。韧性逆冲剪切带具有向南和南西扩展和迁移的趋势,并老于STD (23~17 Ma)和MCT (24~20 Ma)^[52]的形成时代。西尼泊尔喜马拉雅 Beni-Jamson 南北向地质剖面的观察表明,韧性逆冲域几乎占据整个的高喜马拉雅(除最顶部的花岗片麻岩外),各种微构造特征均显示逆冲指向朝南,并伴随倒转变质作用(夕线石-蓝晶石-石榴石-黑云母),推测大规模的逆冲型剪切域起始位置应在GHC上部,形成时间应早于26 Ma。表明韧性逆冲剪切带形成早于高喜马拉雅的挤出时代(24~17 Ma)。

显示老的韧性剪切带(TSZ)起始早于26 Ma(独居石测年^[72]),并逐渐向南迁移,早于STD和MCT的(23~17 Ma)的形成^[52]。

与前人提出的模式不同,笔者认为高喜马拉雅岩片的挤出经历如下阶段:

(1) 局部熔融阶段:45~33 Ma的中地壳局部熔融导致地壳增厚,并在GHC中产生高级变质、深熔作用和高温韧性变形,开始热挤出。此反应可能与

深部MHT活动有关。

(2) 韧性逆冲作用:具有向南剪切指向的韧性逆冲剪切带在>26 Ma形成于GHC上部,并向南(下部)逐渐扩张和迁移,构成具有一定规模的韧性逆冲剪切域。

(3) 在27~22 Ma,由于侧向地壳增厚梯度变化及平行山脉的重力裂陷在韧性逆冲剪切带的上部产生近E-W向伸展型韧性剪切带。

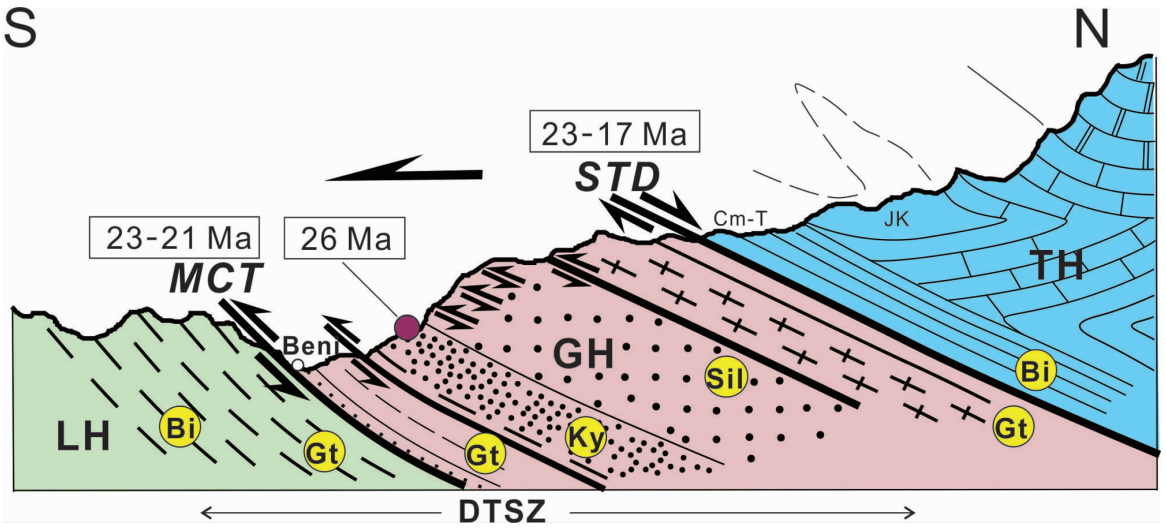
(4) 高喜马拉雅的挤出阶段:在23~17 Ma,MCT的逆冲和STD的拆离同时发生,促使GHC的快速挤出,并在印度大陆北缘形成特提斯喜马拉雅(THC)、高喜马拉雅(GHC)和低喜马拉雅(LHC)3个构造单元。

继后,在10~5 Ma,先后产生MBT和MFT,次喜马拉雅单元(SHC)形成。INDEPTH资料显示,STD,MCT,MBT和MFT与深部的MHT的向南扩展有关。

4 讨论和结论

作为喜马拉雅造山带变质核的高喜马拉雅岩片,是以高级变质岩石、普遍的深熔反应以及高温韧性变形为主要特征,显示热碰撞造山的典型特征。

研究表明,受藏南拆离系(STD)和主中冲断裂



TH-特提斯喜马拉雅;GH-高喜马拉雅,LH-低喜马拉雅,STD-藏南拆离系,MCT-主中冲断裂,
Bi-黑云母,Gt-石榴石,Sil-夕线石,Ky-兰晶石

图 5 西尼泊尔变质-构造剖面

Fig.5 Tectono-metamorphic profile of the western Nepal- Himalaya orogen

(MCT) 夹持的高喜马拉雅岩片(GHS)同时具有垂直造山和平行造山的运动矢量,MCT 和 STD 分别活动在 23~17 Ma 和 23~21 Ma^[2],而平行造山的韧性伸展构造起始于 28~26 Ma,主要活动于 25~17 Ma^[7]。尼泊尔—喜马拉雅的研究表明,一条具有向南剪切指向的韧性逆冲型剪切带占据高喜马拉雅岩片的大部分空间,其形成于 GH 上部,其初始活动时间早于 26 Ma,并向南(下部)逐渐扩张和迁移,结束于 21 Ma,构成具有一定规模的韧性逆冲剪切域。笔者建立高喜马拉雅的 3-D 挤出模式,并提出局部熔融阶段:(1) 45~33 Ma 的中地壳局部熔融导致地壳增厚,并在 GH 中产生高级变质、深熔作用和高温韧性变形;(2) 早于 26 Ma 期间,具有向南剪切指向的韧性逆冲剪切带形成于 GH 上部,并向南(下部)逐渐扩张和迁移;(3) 27~22 Ma,在 GH 的上部产生近 E-W 向韧性伸展型剪切带;(4) 在 23~17 Ma 高喜马拉雅的挤出阶段。INDEPTH 资料显示,STD, MCT, MBT 和 MFT 与深部的 MHT 的向南扩展有关。

致谢:笔者与 A. Pecher 教授(法国)、J. P. Burg 教授(瑞士)进行有益的讨论,特此感谢。

参考文献(References):

[1] Tapponnier P. Slip-line field theory and large-scale continental

tectonics [J]. 1976, 264(25):319-324.
 [2] Burg J P, Chen G M. Tectonics and structural formation of southern Tibet, China [J]. Nature, 1984, 311:219-223.
 [3] Burchfiel B C, Royden L H. North-south extension within the convergent Himalayan region[J]. Geology, 1985, 13(10):679-682.
 [4] 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]. Geological Society of America Special Paper, 1992, 269:1-41.
 [5] 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.
 Cui Junwen, Zhu Hong, Wu Chang, et al. Deformation and Dynamics of the Lithosphere in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:1-164(in Chinese).
 [6] Brookfield M E. The Himalayan passive margin from Precambrian to Cretaceous times [J]. Sedimentary Geology, 1993, 84:1-35.
 [7] Le Fort P. Evolution of the Himalaya, in The Tectonics of Asia [M]. Cambridge University Press, New York, 1996:95-106.
 [8] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2000, 28:211-280.
 [9] Burg J P, Nievergelt P, Oberli F, et al. The Namche Barwa syntaxis, evidence for exhumation related to compressional crustal folding [J]. J. Asian Earth Sc., 1998, 16:239-252.
 [10] Carosi R, Lombardo B, Musumeci G, et al. Geology of the Higher Himalayan Crystallines in Khumbu Himal (eastern Nepal) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1999, 17:785-803.

- [11] Pecher A. Deformations et metamorphisme associes a une zone de cisaillement. Example dugrand chevauchement central himalayan (MCT),transversale des Annapurna et du Manaslu, Nepal [J]. PHD Grenoble, 1978, 310.
- [12] Pecher A. The metamorphism in Central Himalaya [J]. *Metam. Geol.*, 1989, 7:31-41.
- [13] Valdiya K S. Tectonics and evolution of the central sector of the Himalaya [J]. *Philos. Trans. Royal Soc. London*, 1988, A326:151-175.
- [14] Vannay J C, Grasemann B. Inverted metamorphism in the High Himalaya of Himachal Pradesh (NW India):Phase equilibria versus thermobarometry [J]. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 1998, 78:107-132.
- [15] 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. *地质通报*, 2002, 21(11):701-707.
Pan Guitang, Li Xingzhen, Wang Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(11): 701-707(in Chinese with English abstract).
- [16] 潘桂棠, 莫宜学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3):521-533
Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):521-533(in Chinese with English abstract)
- [17] Hodges K V, Whipple K X, Hurtado J M. Himalayan neotectonics may imply active southward extrusion of Tibetan middle crust [J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2001, 81(48): 1094.
- [18] Johnson M R W. Shortening budgets and the role of continental subduction during the India Asia collision [J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 59:101-123.
- [19] DeCelles P G, Robinson D M, Zandt G. Implications of shortening in the Himalayan fold-thrust belt for uplift of the Tibetan plateau [J]. *Tectonics*, 2002, 21(6):1062.
- [20] Avouac J P. Mountain building, erosion, and the seismic cycle in the Nepal [J]. *Advances in Geophysics*, 2003, 46:1-80.
- [21] Searle M P, Waters D J, Rex A J, et al. Pressure, temperature, and time constraints on Himalayan metamorphism from eastern Kashmir and western Zaskar [J]. *J. Geol. Soc.*, 1992, 149:753-773.
- [22] Thakur V C, Rawat B S. Geological Map of Western Himalaya, 1:1000000 [M]. Wadia Institute of Himalayan Geology, Dehra Dun, India, 1992.
- [23] Steck A. Geology of the NW Indian Himalaya [J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 2003, 96:147-213.
- [24] Di Pietro J A, Pogue K R. Tectonostratigraphic subdivisions of the Himalaya: a view from the west [J]. *Tectonics*, 2004, 23, TC5001, DOI:10.1029/2003TC001554.
- [25] Acharyya S K. Structural framework and tectonic evolution of the eastern Himalaya [J]. *Himalayan Geology*, 1980, 10:412-439.
- [26] Singh S, Chowdhary P K. An outline of the geological framework of the Arunachal Himalaya [J]. *Journal of Himalayan Geology*, 1990, 1:189-197.
- [27] Kumar G. Geology of Arunachal Pradesh [M]. Bangalore: Geological Society of India, 1997:217.
- [28] Bijwaard H, Spakman W. Closing the gap between regional and global travel time tomography [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1998, 103(12):30055-30078.
- [29] Vander Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Tethyan subducted slabs under India [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171:7-20.
- [30] Nábelek J, Hetényi G, Vergne J, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet Collision Zone Revealed by the Hi-CLIMB Experiment [J]. *Science*, 2009, 325:1371-1374.
- [31] Tilmann F, Ni J, INDEPTH seismic team. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet [J]. *Science*, 2003, 300:1424-1427.
- [32] Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, et al. Seismic Evidence for a Detached Indian Lithospheric Mantle Beneath Tibet [J]. *Science*, 1999, 283(5406):1306-1309.
- [33] Negredo A M, Replumaz A, Villaseñor A, et al. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259: 212-225.
- [34] Zhao W, Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet [J]. *Nature*, 1993, 366:557-559.
- [35] Bird P. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96:10275-10286.
- [36] Grujic D, Casey M, Davidson C, et al. Ductile extrusion of the Higher Himalayan Crystalline in Bhutan:evidence from quartz micro-fabrics [J]. *Tectonophysics*, 1996, 260:21-43.
- [37] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow [J]. *Geology*, 2000, 28(8): 703-706.
- [38] Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation [J]. *Nature*, 2001, 414:738-742.
- [39] Daniel C G, Hollister L S, Parrish R R, et al. Exhumation of the Main Central Thrust from lower crustal depths, Eastern Bhutan Himalays [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21:317-334.
- [40] Cottle J M, Jessup M, Newell D, et al. Geochronology of granulitized eclogite from the Ama Drime massif: implications for the tectonic evolution of the South Tibetan Himalaya [J]. *Tectonics*, 2009, 28(1):TC1002.
- [41] Law R D, Searle M P and Godin L. Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones [M]. Geological Society Special Publication, 2006:1-613.

- [42] Royden L H. Coupling and decoupling of crust and mantle in convergent orogens: implications for strain partitioning in the crust [J]. *Journal Geophysics Research*, 1996, 101:17679–17705.
- [43] Shen F, Royden L H, Burchfiel B C. Large-scale crustal deformation of the Tibetan plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106:6793–6816.
- [44] Wu C D, 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.
- [45] Vannay J C, Grasemann B. Himalayan inverted metamorphism and syn-convergence extension as a consequence of a general shear extrusion [J]. *Geological Magazine*, 2001, 138(3):253–276.
- [46] Jamieson R A, Culshaw N G, Wodicka N, et al. Timing and tectonic setting of Grenvillian metamorphism—Constraints from a transect along Georgian Bay, Ontario [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1992, 10:321–332.
- [47] Jamieson R A, Beaumont C, Medvedev S, et al. Crustal channel flows: 2. Numerical models with implications for metamorphism in the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B6):1–24.
- [48] Grujic D, Hollister L S, Parrish R R. Himalayan metamorphic sequence as an orogenic channel: insight from Bhutan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(1/2):177–191.
- [49] Searle M P, Szulc A G. Channel flow and ductile extrusion of the high Himalayan slab—the Kangchenjunga–Darjeeling profile, Sikkim Himalaya [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 173–185.
- [50] Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B06406):1–29.
- [51] Beaumont C, Nguyen M H, Jamieson R A, et al. Crustal flow modes in large hot orogens [J]. *Special Publications*, 2006, 268: 91–145.
- [52] Godin B. The Linear Model of Innovation The Historical Construction of an Analytical Framework [J]. *Science, Technology, & Human Values*. 2006, 31(6):639–667.
- [53] Jamieson R A, Beaumont C, Nguyen M H, et al. Provenance of the Greater Himalayan Sequence and associated rocks: predictions of channel flow models [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2006, 268:165–182.
- [54] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation [J]. *Earth Sci. Rev.*, 2006, 76:1–131.
- [55] Webb A G, An Yin, Harrison T M, et al. The leading edge of the Greater Himalayan Crystalline complex revealed in the NW Indian Himalaya: Implications for the evolution of the Himalayan orogen [J]. *Geology*, 2007, 35(10):955–958.
- [56] Webb A G, Schmitt A K, He Dian, et al. Structural and geochronological evidence for the leading edge of the Greater Himalayan Crystalline complex in the central Nepal Himalaya [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304:483–495.
- [57] Grujic D, Hollister L S, Parrish R R. Himalayan metamorphic sequence as an orogenic channel: insight from Bhutan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(1/2):177–191.
- [58] Guillot S G, de Sigoyer M J, Hattori K H, et al. Tethyan and Indian subduction viewed from the Himalayan high- to ultrahigh-pressure metamorphic rocks [J]. *Tectonophysics*, 2008, 451:225–241.
- [59] Searle M P, Godin L. The South Tibetan Detachment and the Manaslu Leucogranite: A structural reinterpretation and restoration of the Annapurna–Manaslu Himalaya, Nepal [J]. *Chicago Journals*, 2003, 111(5):503–523.
- [60] Searle M P, Law R D, Godin L, et al. Defining the Himalayan Main Central Thrust in Nepal [J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165:523–524.
- [61] Brun J P, Burg J P, Ming C C. Strain trajectories above the Main Central Thrust (Himalaya) in southern Tibet [J]. *Nature*, 1985, 313: 388–390.
- [62] Murphy M A, Yin A, Kapp P, et al. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: implications for the eastward extent of the Karakoram fault system [J]. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 2002, 114:428–447.
- [63] Pêcher A. The contact between the Higher Himalaya crystallines and the Tibetan sedimentary series: Miocene large scale dextral shearing [J]. *Tectonics*, 1991, 10:587–598.
- [64] Coleman M E. Orogen-parallel and orogen-perpendicular extension in the central Nepalese Himalayas [J]. *Geo. Soc. Am. Bull.*, 1996, 298:553–571.
- [65] Epard J L, A Steck. The Eastern prolongation of the Zaskar shear zone (Western Himalaya) [J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 2004, 97: 193–212.
- [66] Thiede R C, Arrowsmith J R, Bookhagen B, et al. Dome formation and extension in the Tethyan Himalaya, Leo Pargil, northwest India [J]. *GSA Bull.*, 2006, 118:635–650.
- [67] Jessup M J, Newell D L, Cottle J M, et al. Orogen-parallel extension and exhumation enhanced by denudation in the trans-Himalayan Arun River gorge, Ama Drime Massif, Tibet–Nepal [J]. *Geology*, 2008, 36:587–590.
- [68] Langille J M, Jessup M J, Cottle J M, et al. Kinematic evolution of the Ama Drime detachment: Insights into orogen-parallel extension and exhumation of the Ama Drime Massif, Tibet–Nepal [J]. *J. Struct. Geol.*, 2010, 32:900–919.
- [69] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原—青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制 [M]. 北京:地质出版社, 2007:1–458.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. Orogenic Plateaux—Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai–Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:1–458 (in Chinese).

- [70] Xu Zhiqin, Wang Qin, Pêche A, et al. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the late Oligocene and Miocene. Article first published online:29 APR, 2013,DOI: 10.1002/tect.20021.
- [71] Xu ZQ, Ji S C, Cai Z H, et al. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology [J]. *Gondwana Res.*, 2012, 21: 19–36.
- [72] Carosi R, Montomoli C, Rubatto D, et al. Late Oligocene high-temperature shear zones in the core of the Higher Himalayan Crystallines (Lower Dolpo, western Nepal) [J]. *Tectonics*, 2010, 29 (4):TC4029.

Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice

XU Zhi-qin¹, WANG Qing², ZENG Ling-sen¹, LIANG Feng-hua¹,
LI Hua-qi¹, QI Xue-xiang¹, CAI Zhi-hui¹, LI Zong-hai¹, CAO Hui¹

(1. *State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China*)

Abstract: The Greater Himalayan Complex (GHC), as the metamorphic core of the Himalayan orogen, shows a “hot” collisional orogen characterized by high-grade (up to granulite facies) metamorphic rocks exhumed from the middle-lower crust, widespread migmatites from extensive anatectic processes and high-temperature ductile deformation. A three-dimensional tectonic model for extrusion of the GHC has been proposed based on the discovery of widespread orogen-parallel ductile extension. It is suggested that extrusion dynamic processes of the GHC are as follows: (1) partial melting in 45–36Ma resulting in the weak and hot middle crust, (2) orogen-parallel gravitational collapse in 28–26Ma, (3) ductile thrusting since > 26 Ma and (4) ductile extrusion resulting from the formation of MCT and STD during 23–17Ma.

Key words: Great Himalaya Complex; three-dimensional extrusion model; hot collisional orogen

About the first author: XU Zhi-qin, female, born in 1941, doctor, academician of Chinese Academy of Sciences, engages in the study of tectonics and structural geology; E-mail: xzq@ccsd.org.cn.