西藏萨嘎地区仲巴微地体韧性滑脱剪切带 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄及其地质意义

张 斌,刘兴平,李随云,史锡理,卢海波,陈 炜,李冰冰
ZHANG Bin, LIU Xingping, LI Suiyun, SHI Xili, LU Haibo, CHEN Wei,LI Bingbing

湖北省地质局第六地质大队,湖北 孝感 432000
No. 6 Geological Party, Hubei Bureau of Geology,*Xiaogan* 432000, *Hubei, China*

摘要:仲巴微地体夹持于雅江缝合带西段分支的南、北亚带之间,地体内发育韧性滑脱型剪切带。对该类高应变构造带活动时间进行厘定,不仅可以为其形成演化提供制约,而且也可为印度-欧亚板块碰撞过程提供重要的年代学佐证信息。在该剪切带不同变形部位采集了含白云母、黑云母糜棱质岩样品,进行云母类单矿物 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 测年。获取年龄数据 3 组:53.39±0.57Ma、39.45±0.42Ma、29.41±0.32Ma,表明该剪切带具有多期次构造活动叠加特征。其中第 1 组年龄代表在印度-欧亚板块初始碰撞阶段,剪切带形成的时代下限(最小年龄),因该剪切带是两大板块初始碰撞的产物,所以可佐证板块起始碰撞时间为 53.39±0.57Ma 之前的晚白垩世末—始新世初期;第 2 组年龄代表在板块主碰撞阶段,发生继承性的近南北向挤压剪切作用后白云母的冷却年龄;第 3 组年龄代表了后碰撞阶段,剪切带的再次滑动后低温隆升时期的黑云母年龄。

关键词:韧性滑脱剪切带;云母 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄;多期次活动;板块碰撞时间;仲巴微地体
中图分类号:P542;P597+.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2017)06-0933-12

Zhang B, Liu X P, Li S Y, Shi X L, Lu H B, Chen W, Li B B. $^{40}Ar-^{39}Ar$ ages of the ductile decollement shear zone in the Zhongba microterrane of Saga region, southwest Tibet, and their geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(6):933-944

Abstract: The ductile decollement shear zones are in Zhongba microterrane which lies between southern subbelt and northern subbelt in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone. The determination of the activity time about the high strain tectonic belt can not only provide constraints for its formation evolution but also provide the important corroborative evidence for the India-Eurasia collision. The samples of muscovite and biotite mylonitic rock were collected from the different parts of deformation in the shear zone to analyze the chronology with the mica $^{40}Ar-^{39}Ar$ dating. The tested ages including 53.39±0.57Ma, 39.45±0.42Ma and 29.41±0.32Ma in three groups indicate that the shear zone has multi-period tectonic activities. Group one which represents the initial stage of the India-Eurasia collision is the age limit of the shear zone (minimum age). Thus the initial time of plate collision should be the end of the Late Cretaceous to the Early Eocene before 53.39±0.57Ma because the shear zone was the product of the initial collision. Group two which is the cooling age of muscovite that formed under the SN- trending shearing compressive stress represents the period of main collisions. Group three which is the biotite age that formed after the reslip of the shear zone slip at low temperature uplifting stage represents the period of post-collision.

Key words: ductile decollement shear zone; mica $^{40}Ar-^{39}Ar$ dating; multi-period activities; plates collision time; Zhongba microterrane

萨嘎地区位于雅鲁藏布江缝合带西段的起始端,是雅鲁藏布江缝合带南、北分支及夹持于两分支之间的仲巴微地体[1]开始出现的部位。对该地区仲巴微地体进行构造地质及年代学研究,是认识雅鲁藏布江缝合带演变及印度-欧亚板块碰撞过程的基础方法之一。

收稿日期:2016-11-03;**修订日期**:2017-05-25
资助项目:中国地质调查局项目《西藏 1:5 万牛库等四幅区域地质矿产调查》(编号:1212011221059)
作者简介:张斌(1975-),男,学士,工程师,从事区域地质调查工作。E-mail:398415457@qq.com

研究发现,除仲巴微地体北南两侧外缘的缝合带分支中发育大规模韧性剪切带外,在该地体奥陶纪—志留纪构造地层内部的刚性岩层(石英岩、大理岩等)与柔性岩层(绢云石英片岩、二云石英片岩等)间的不同物性岩层界面附近,还发育韧性滑脱型剪切带。暗示仲巴微地体在印度-欧亚板块碰撞之前已经裂解漂移就位,并历经了新特提斯洋的俯冲-两大板块碰撞的构造演化过程。

随着青藏高原1:5万区域地质调查工作的陆续开展,在萨嘎以西的仲巴微地体分布区,也发现韧性剪切带的相关报道①[2],反映在仲巴微地体志留系与二叠系地层接触部位,发育脆-韧性剪切带,并对剪切带的变形特征、机制、变形阶段等做过相关研究,但迄今为止,没有关于仲巴微地体内韧性剪切带的年代学成果发表。为了对其形成和活动时间进行制约,以及为印度-欧亚板块碰撞过程提供较可靠的年代学证据,结合野外地质调查分析,对该韧性滑脱剪切带进行$^{40}Ar-^{39}Ar$年代学研究。

1 地质背景

仲巴微地体是雅鲁藏布江结合带三大次级构造单元之一[3](含雅江蛇绿混杂岩带、中东段南侧的朗杰学增生楔、西段仲巴地块),夹持于雅江缝合带西段分支的南、北亚带之间,主要出露古生代及部分中生代海相地层(图1),变质程度主体达到绿片岩相。依据区域碎屑锆石年龄谱、生物化石亲缘关系对比等证据,该地体目前多被认为是源于印度板块(大陆)北缘裂解分离、自南向北漂移而来的古陆块[4-6]①②。

本次完成的1:5万牛库等四幅区域地质调查报告②,在地体岩性组合、化石、碎屑锆石测年、构造变形等,以及区域对比的基础上,划分出3个群级8个组级地层单位。①奥陶系—志留系紫曲浦群,下分紫曲石组(O_2-Sz*qs*)和紫曲电站组(O_2-Sz*qd*),岩石组合总体为以大理岩、片理化大理岩(钙质片岩)夹绿泥绢云(石英)片岩为主的钙质变质岩系,是碳酸盐台地环境的产物。②二叠系曲嘎群,下分岗珠淌组($P_{1-2}g$)、仲巴组($P_{2-3}zh$)、卡扎勒组(P_3k)。原岩由碳酸盐岩及泥砂质沉积岩系组成,形成于克拉通盆地上的陆表浅海环境。③三叠系穷果群,下分屯具场组(T_1tc)、屯具日组($T_{1-2}tr$),原岩为一套变化于滨岸-陆棚沉积环境的碎屑岩;新建命名奥陶系—志留系达吉岭组(O_2-S*d*,碎屑锆石U-Pb年龄峰值主要集中于426~460Ma),下分3个岩性段,原岩是一套浅海相泥砂质沉积岩系。其中的奥陶系—志留系紫曲浦群及达吉岭组皆遭受强烈剪切作用,发生显著的固态流变,它们空间上呈上下叠置次序,同为区内仲巴微地体达吉岭复式背斜褶皱核部的地层体。

晚古生代早二叠世末或中晚二叠世,仲巴微地体从冈瓦纳古大陆北缘初始裂解分化,以下二叠统才巴弄组等发育大陆裂谷环境变质玄武质火山岩[7]为标志。早三叠世,随着裂谷环境向弧后洋盆的演变和特提斯洋盆的打开,仲巴微地体从冈瓦纳大陆裂离,形成雅鲁藏布江洋盆中的独立微地体,以仲巴微地体下—中三叠统穷果群与其呈深大断裂接触的南亚带中—上三叠统修康岩群,在沉积建造及沉积环境方面存在明显差异为依据,穷果群原岩为一套变化于滨岸-陆棚沉积环境的碎屑岩;修康岩群主体为一套深海盆地相类复理石浊积岩系沉积体②。晚三叠世以来,仲巴微地体参与了新特提斯洋的俯冲终结、印度-欧亚大陆碰撞、青藏高原隆升造山运动等一系列复杂的地质构造演化过程,内部发育的韧性滑脱剪切带,即是该地体参与上述区域构造演化过程的证据。

2 剪切带的基本特征及变形温度估计

仲巴微地体经历了特提斯洋演化及青藏高原隆升过程中多期次的构造活动叠加改造作用,褶皱、脆韧性断裂十分发育,构造变形复杂。萨嘎地区的仲巴微地体发育大型达吉岭复式倾伏褶皱,奥陶系—志留系达吉岭组、紫曲浦群构成南东东倾伏的达吉岭复式背斜核部,翼部由二叠系曲嘎群、三叠系穷果群组成。奥陶系—志留系,尤其是达吉岭组发生强烈的塑性剪切流变,在奥陶系—志留系达吉岭组与紫曲浦群下部的紫曲石组接触界面附近,存在一条宽度(垂向厚度)大于2200m的韧性剪切带(初始产出状态可能近水平),因该剪切带主界面主要产生在奥陶系—志留系刚性、柔性相间(刚性为主)的不同物性岩层界面附近,故为韧性滑脱剪切带(图版Ⅰ-a)。奥陶系—志留系达吉岭组(O_2-S*d*)中的柔性层(绢云石英片岩、二云石英片岩等)构成主要的滑脱层。这一构造变形带形成于特提斯洋演化过程滑脱剪切应变期,而达吉岭复式倾伏

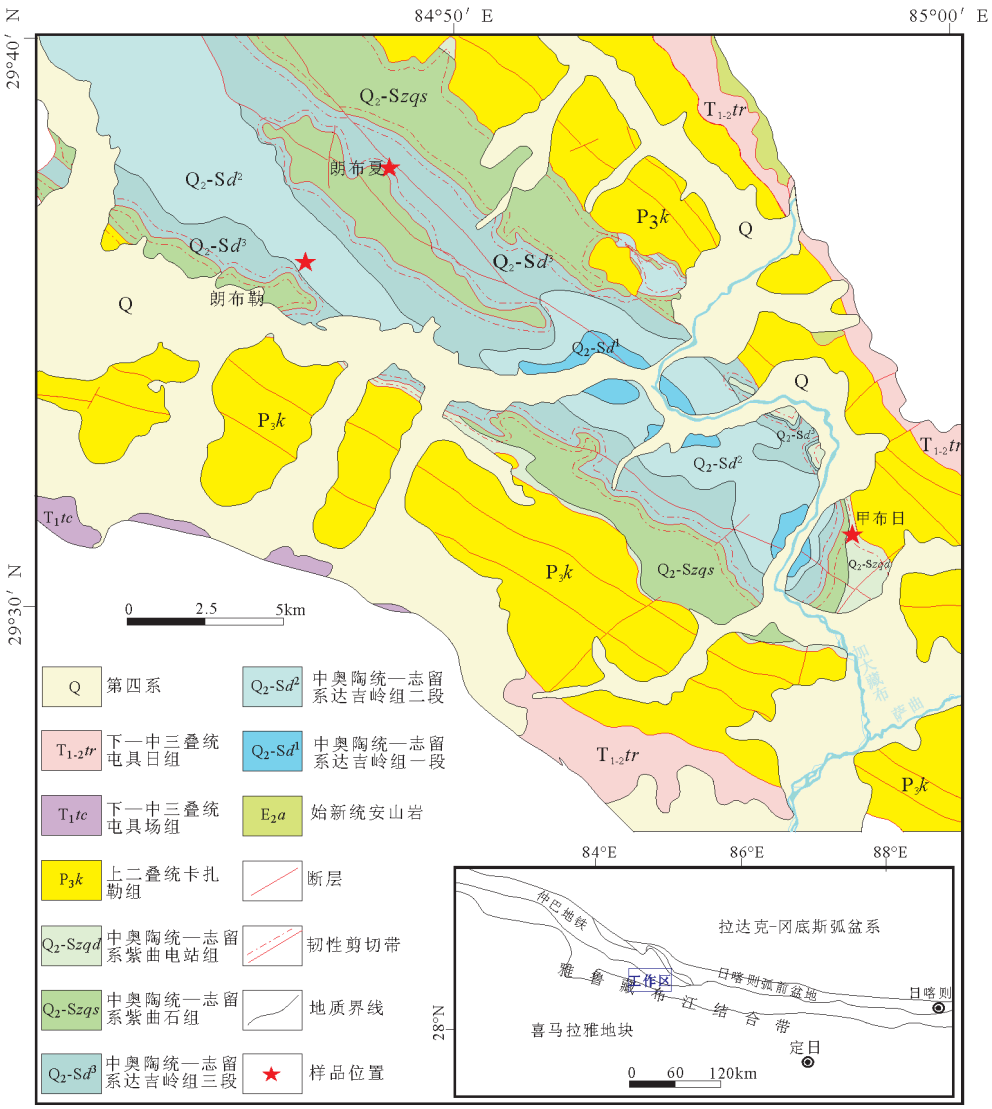


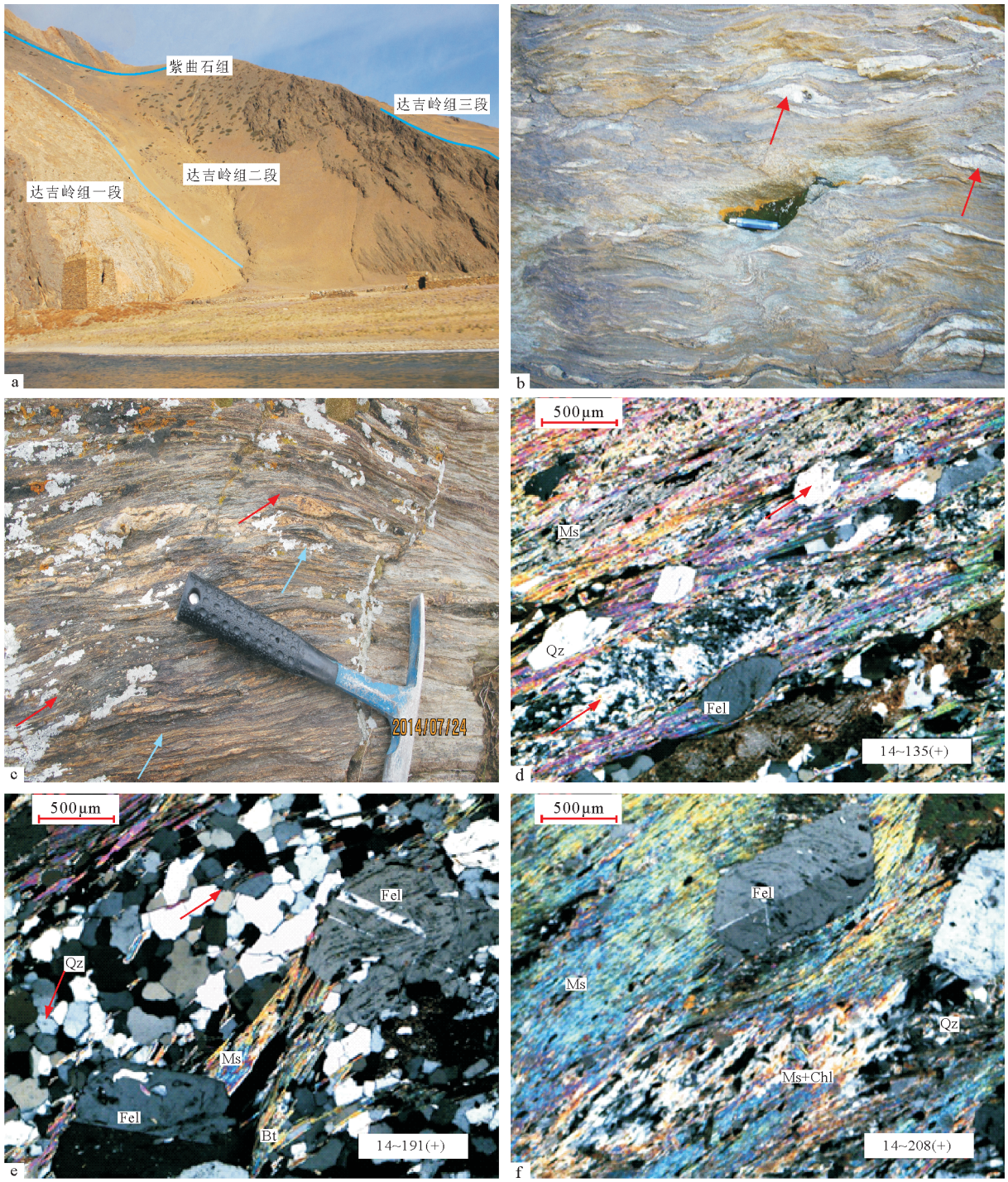
图 1　萨嘎地区仲巴微地体韧性滑脱剪切带分布区地质构造及采样位置

Fig. 1　Schematic map showing the geological structures and the sampling locations of the ductile decollement shear zone and adjacent areas in the Zhongba microterrane from Saga region, Tibet

背斜是继剪切带形成之后构造叠加继承性收缩挤压的产物。从岩石的塑性变形程度看，卷入该剪切带的变形地层岩石存在强弱不同的变形相，垂向上大致可分为 3 带：中央强滑脱剪切变形带和位于其上、下部位的弱滑脱剪切变形带。强滑脱剪切变形带位于剪切带中心部位的奥陶系—志留系达吉岭组二段（O_2-Sd^2）及三段（O_2-Sd^3）柔性滑脱层内，而上、下两侧弱变形带的边界不甚清楚，呈渐变过渡消失状态，相当于达吉岭组一段（O_2-Sd^1）上部及紫曲石组（O_2-Szqs）至紫曲电站组（O_2-Szqd）下部的刚性和弱刚性石英砂岩与碳酸盐岩为主的岩层。

实测显示，中央强滑脱剪切变形带内岩石发生显著塑性流变，发育密集的透入性 S 形流劈理，形成长英质、钙质糜棱岩，分布平行排布的条带状或网结状透镜体（图版 Ⅰ-b），在达吉岭组二段可见流状长英质岩石和极薄层条带状云母片岩相间成对出现；而弱变形带则以破劈理为主，流劈理不发育，出现糜棱岩化岩石、片理化岩石（图版 Ⅰ-c）至未变形岩石等。中央强滑脱剪切变形带的变形岩石宏观组构标志有 S-C 组构、旋转碎斑系、剪切透镜体、不对称褶皱、紧闭同斜褶皱等，在变形主界面附近发育褶皱轴与糜棱岩面理平行的 A 型小褶皱，可

图版Ⅰ Plate Ⅰ



a.仲巴微地体滑脱韧性剪切带宏观分布位置(达吉岭组内);b.中央强变形带糜棱岩中长英质小透镜体(红色箭头所指部分);c.强变形带外侧紫曲石组黄褐色片理化大理岩(青色箭头所指土黄色部分"mb",肉眼所见互层之单层极薄)与青灰色绿泥绢云片岩(红色箭头所指灰色部分)互层;d.强变形带长英质糜棱片岩中,由多晶石英为主组成的条带状或眼球状集合体(红色箭头所指部分),以及孤立分布发生重结晶的旋转状长石、石英单体;e.糜棱岩化石英片岩中,石英呈重结晶状,可见"S"旋转形的长石斑晶,具有压力影,影子矿物为长石或云母,红色箭头指示三边节点平衡结构;f.弱变形带绿泥石长石二云片岩中长石变斑晶中双晶及解理纹;Qz—石英;Ms—白云母;Fel—长石;Bt—黑云母;Chl—绿泥石

见显示剪切运动矢量的顺层拉伸B型线理——石香肠等，带内层间同斜紧闭褶皱多以原始层理面(S_0)为变形面，褶皱轴面平行于片理(S_1)面。这些A型褶皱轴面、B型线理、挤压透镜A轴和剪切面理S_1，在区域上与片理及层理S_0平行，反映了近南北向的剪切运动方向。变形岩石镜下主要微观组构标志为：长石、石英碎斑呈不规则状、眼状状、透镜状定向排列，矿物拉伸线理平行剪切方向等；云母沿透镜体长轴方向分布，旋斑见长石云母压力影；碎斑及碎基中发育破裂及具塑性特征的显微构造，如长石双晶扭曲、云母褶曲、石英波(带)状消光、残斑边缘细粒化、核幔构造；方解石重结晶、石英重结晶(亚颗粒旋转动态重结晶形成条带状、眼球状多晶集合体)等。此外，部分糜棱岩薄片中可见沿早期长石残斑解理纹及脆性破裂面充填有新生白(绢)云母，且新生片状矿物沿C面理定向或环绕长英质眼球构造分布等特征，反映糜棱岩在经历高温静态重结晶之后，又叠加了后期继承性的脆-韧性剪切变形作用。

糜棱岩中的矿物组合，尤其是其中的石英、长石的变形现象与变形温度密切相关[8-11]。根据石英、长石的显微构造特征，可以进行糜棱岩的形成变形温度估算[12-14]。石英在300~700℃之间依次经历膨凸式重结晶(BLG)、亚颗粒旋转重结晶(SGR)及颗粒边界迁移重结晶(GBM)3种形式[8]。其中在300~380℃表现为BLG；380~420℃区间，由BLG向SGR转变，2种结晶形式共存；420~480℃以SGR存在；480~530℃范围则由SGR向GBM转变，2种结晶形式共存；530℃以上表现为独立的GBM结晶。长石在400℃以上开始出现塑性拉长，在500℃开始出现动态结晶[9-10]，在500~600℃范围表现为BLG；650~700℃范围BLG型与GBM型共存；700~800℃以独立的SGR存在；800~850℃范围SGR与GBM两种结晶形式共存；850℃以上呈独立的GBM结晶形式。据上述判别标准，结合本次糜棱岩中的矿物组合及石英、长石显微构造特征，估计糜棱岩变形形成温度主要介于400~600℃之间(表1；图版Ⅰ-d~f)，与前人在萨嘎北西相邻的仲巴地区通过分形法计算得出的仲巴微地体内韧性变形温度范围(330~570℃[2])吻合。

$^{40}Ar-^{39}Ar$同位素年龄数据的解释是以构造热事件发生的温度与测年矿物封闭温度为基础的。构造变形的温度能否高于测试矿物的封闭温度，关系到测试对象在变形中Ar同位素体系能否被重置，记录下变形或冷却至封闭温度的时间。本次估计的仲巴微地体韧性滑脱剪切带的变形温度主要介于400~600℃之间，远高于年代学测试的单矿物封闭温度(白云母为350±50℃；黑云母为300±50℃)[15-19]，即使所选测试矿物都是在糜棱岩化过程之前形成的，其K-Ar同位素体系也会被完全重置[11]，获得的年龄结果在正常情况下，应为剪切带形成之后的冷却年龄，因此样品适于进行$^{40}Ar-^{39}Ar$测年。

3　样品选择及测试方法

为厘定仲巴微地体内韧性滑脱剪切带的构造变形时代，在该剪切带变形强弱不同构造部位采集了3件糜棱岩及片理化岩石样品(图1)，以样品中的(白、黑)云母矿物为研究对象，进行$^{40}Ar-^{39}Ar$年龄测

表1　仲巴微地体韧性滑脱剪切带$^{40}Ar-^{39}Ar$测年样品镜下主要特征及温度

Table 1　Microscopic identification results and formation temperature estimates of samples for $^{40}Ar-^{39}Ar$ dating of the ductile decollement shear zone in the Zhongba microterrane

样品号	岩石类型	矿物组合	石英主要变形特征	长石主要变形特征	温度估计
CZ20-A45 /PM026-TW$_1$	长英质糜棱片岩	残斑：(30%)Fel +Qz 基质：(70%)Fel +Qz+Ms	亚颗粒多晶条带状或眼球状集合体，孤立石英旋转单体SGR+BLG	旋转单体；重结晶，与石英颗粒构成定向、片状构造；强剪切部位可见残斑边缘细粒化和透镜化BLG	400~600℃
GZ20-A46 /PM026-TW$_2$	糜棱岩化白云石英片岩(初糜棱岩)	残斑：(55%)Fel +Qz+Ms 基质：(45%)Fel +Qz+Ms+ Bt	可见三结点平衡重结晶结构GBM	“S”旋斑；具压力影，影子矿物为长石或云母BLG	500~600℃
GZ20-A47 /PM027-TW$_1$	绿泥石长石二云片岩	Bt +Ms+ Fel +Chl+Qz	少量，颗粒均径0.1mm，定向排列	呈变斑晶，可见双晶及解理纹	<300℃

注：Fel—长石；Qz—石英；Ms—白云母；Bt—黑云母；Chl—绿泥石

定。在朗布勒地区达吉岭复式背斜西段南部，采集了1件中央强滑脱剪切变形带达吉岭组二段内的长英质糜棱片岩样品（PM026-TW$_1$），该样品受到早期滑脱剪切应变作用强烈影响，但受后期叠加构造变形作用影响较弱，可对早期滑脱剪切应变作用的时代（剪切带形成时代）进行限制；在朗布夏地区达吉岭复式背斜西段北部扬起端的紫曲石组下部，采集弱变形带内的1件糜棱岩化绿泥白云石英片岩样品（PM026-TW$_2$），该样品受早期滑脱剪切应变作用影响变弱，但受后期叠加构造变形作用影响较强烈；在甲布日地区达吉岭复式背斜东端倾伏段端的紫曲电站组，采集了1件含绿泥石长石二云片岩样品（PM027-TW$_1$），该样品受到早期滑脱剪切应变作用影响微弱，但受后期叠加构造变形作用影响强烈。在朗布夏及甲布日地区采集的2件样品，用于研究该剪切带形成之后、后期继承性构造叠加活动的时代。

^{40}Ar-^{39}Ar同位素年龄测定工作在中国地质科学研究院地质研究所实验室进行。分析样品先挑选纯的云母矿物（纯度大于99%），并用超声波及丙酮分别清洗矿物表面和裂隙中吸附的粉末、杂质、表面油污等有机质。清洗后的样品被封进石英瓶中，送至中国原子能科学研究院的“游泳池堆”进行照射。^{40}Ar-^{39}Ar测试所有误差置信区间为2σ。详细分析测试流程见参考文献[20-21]。

4 测试年龄结果

3件样品单矿物^{40}Ar-^{39}Ar分析数据见表2，坪年龄与等时线年龄值及参数见图2。

CZ20-A45/PM026-TW$_1$样品，其白云母坪年龄（t_p）为53.39±0.57Ma（6~16温阶，94.75%的^{39}Ar释放量，MSWD=1.7，J=0.00974131±0.00004871）；总气体年龄（t_t）为53.30±0.56Ma；^{36}Ar/^{40}Ar-^{39}Ar/^{40}Ar反等时线年龄（t_i）为52.84±0.7Ma（MSWD=1.11）；^{40}Ar/^{36}Ar-^{39}Ar/^{36}Ar正等时线年龄（t_n）为52.89±0.78Ma（MSWD=1.1），各年龄值在误差范围内相互吻合。^{40}Ar/^{36}Ar初始比值为320±27，略大于现今大气氩标准尼尔值（295.5±5），可能是后期叠加热事件扰动所致，但该样品具有较好的年龄坪，且坪年龄与正、反等时线年龄及总气体年龄在误差范围内高度吻合，因此可用于地质解释。

GZ20-A46/PM026-TW$_2$样品，其白云母坪年龄（t_p）为39.45±0.42Ma（8~17温阶，93.55%的^{39}Ar释放量，MSWD=0.81，J=0.00977899±0.00004889）；总气体年龄（t_t）为39.35±0.42Ma；^{36}Ar/^{40}Ar-^{39}Ar/^{40}Ar反等时线年龄（t_i）为40.13±0.86Ma（MSWD=0.50）；^{40}Ar/^{36}Ar-^{39}Ar/^{36}Ar正等时线年龄（t_n）为40.13±0.86Ma（MSWD=0.5），各年龄值在误差范围内相互吻合，样品具有较好的年龄坪。^{40}Ar/^{36}Ar初始比值为246±54，在误差范围内与现今大气氩标准尼尔值（295.5±5）基本一致。说明取得的该样品白云母的^{40}Ar/^{39}Ar坪年龄39.45±0.42Ma是有效的，可用于地质解释。

GZ20-A47/PM027-TW1样品，其黑云母坪年龄（t_p）为29.41±0.32Ma（7~16温阶，92.25%的^{39}Ar释放量，MSWD=1.18，J=0.00981622±0.00004908）；总气体年龄（t_t）为29.22±0.31Ma；^{36}Ar/^{40}Ar-^{39}Ar/^{40}Ar反等时线年龄（t_i）为29.56±0.47Ma（MSWD=1.21）；^{40}Ar/^{36}Ar-^{39}Ar/^{36}Ar正等时线年龄（t_n）为29.56±0.47Ma（MSWD=1.22），各年龄值在误差范围内相互吻合，样品具有较好的年龄坪。^{40}Ar/^{36}Ar初始比值为287±19，在误差范围内与现今大气氩标准尼尔值（295.5±5）基本一致。说明该样品黑云母的^{40}Ar/^{39}Ar坪年龄29.41±0.32Ma是有效的，可用于地质解释。

5 讨 论

5.1 韧性滑脱剪切带形成时间

本次获得的仲巴微地体韧性滑脱剪切带中3组不同的^{40}Ar-^{39}Ar年龄谱数据，其中CZ20-A45/PM026-TW$_1$长英质糜棱岩样品为早期韧性剪切作用的产物，受后期叠加剪切变形作用影响较弱，其白云母坪年龄值为53.39±0.57Ma，是3组年谱中最大的冷却年龄，最接近于韧性滑脱剪切带的初始变形年龄。由于该样品的含钾测年对象为白云母，白云母的Ar同位素单矿物封闭温度为350±50℃，而CZ20-A45/PM026-TW$_1$糜棱岩样品所在剪切带的变形温度在500℃左右，高于白云母的封闭温度，所得白云母53.39±0.57Ma的年龄值，仅代表高温剪切作用后，350℃左右低温冷却阶段的白云母年龄，与韧性剪切作用开始时间相比，相对滞后。因此，对仲巴微地体韧性滑脱剪切带初始形成时间的准确制约，还需要结合剪切带成因及与其对应的区域构造演化事件时限对比确定。

表 2　$^{40}Ar-^{39}Ar$ 定年分析数据

Table 2　Results of $^{40}Ar-^{39}Ar$ dating of the sample

加热阶段			$^{36}Ar(a)$ [fA]	$^{37}Ar(Ca)$ [fA]	$^{38}Ar(Cl)$ [fA]	$^{39}Ar(K)$ [fA]	$^{40}Ar(r)$ [fA]	视年龄/Ma ± 2σ	$^{40}Ar(r)$ /%	$^{39}Ar(K)$ /%	K/Ca±2σ
15WHA0024B-005	3.8 %		0.65300	0.87192	0.00000	226.769	716.327	54.81± 0.88	78.73	0.63	146± 39
15WHA0024B-006	4.2 %		0.71451	1.10130	0.00000	235.016	746.821	55.13± 0.96	77.92	0.65	120± 33
15WHA0024D-001	4.6 %		0.64605	0.43048	0.00000	248.696	790.669	55.15± 0.86	80.50	0.69	324± 94
15WHA0024D-002	5.0 %		0.97669	1.31700	0.00000	446.225	1426.86	55.47± 0.72	83.13	1.24	190±34
15WHA0024D-003	5.5 %		1.25427	2.29701	0.00000	730.435	2309.23	54.85± 0.67	86.12	2.03	178±14
15WHA0024D-004	6.0 %	4	1.54475	3.98124	0.00000	851.880	2649.12	53.97± 0.67	85.25	2.37	120± 5
15WHA0024D-005	6.5 %	4	1.72817	6.42891	0.00000	992.268	3055.59	53.45± 0.65	85.63	2.76	86± 4
15WHA0024D-006	7.0 %	4	1.74512	4.45973	0.00000	1133.59	3514.17	53.80± 0.64	87.15	3.16	142± 10
15WHA0024F-001	8.0 %	4	1.79539	3.58805	0.00000	1386.18	4309.24	53.95± 0.61	88.98	3.86	216± 19
15WHA0024F-002	10.0 %	4	3.07161	8.68843	0.0000	2449.01	7548.44	53.50± 0.62	89.21	6.82	158± 8
15WHA0024F-003	13.0 %	4	5.36809	10.82452	0.00000	4235.91	13028.84	53.39± 0.60	89.09	11.79	219± 15
15WHA0024F-004	16.0 %	4	4.68188	11.26160	0.00000	3842.00	11766.95	53.16± 0.59	89.42	10.70	191± 11
15WHA0024F-005	20.0 %	4	6.62380	13.82360	0.00000	5804.36	17705.38	52.95± 0.58	89.98	16.16	235± 14
15WHA0024F-006	30.0 %	4	8.06352	17.40050	0.00000	7846.06	23937.25	52.96± 0.57	90.88	21.84	253± 13
15WHA0024H-001	35.0 %	4	2.32662	1.83880	0.00000	5101.94	15599.31	53.07± 0.54	95.71	14.20	1554± 211
15WHA0024H-002	40.0 %	4	0.16158	0.00000	0.00000	391.09	1203.68	53.42± 0.65	96.11	1.09	1405± 214
			41.35503	88.31372	0.00000	35921.44	110307.90				

J(照射参数)	结果	$^{40}(r)/^{39}(K)$ ±2σ		年龄/Ma ± 2σ		MSWD	$^{39}Ar(K)$/%	K/Ca±2σ
0.00974131 ± 0.00004871	坪年龄	3.07582	± 0.01295 ± 0.42%	53.39	± 0.57 ±1.07% ±1.04 ±0.22	1.47 15% 1.89 1.2107	94.75 11 2σ置信区间 误差放大率	126± 34
	总气体年龄	3.07081	± 0.01214 ± 0.40%	53.30	±0.56 ±1.06% ±1.04 ±0.21		16	228± 5

15WHA0025B-001	3.0 %		1.09277	2.91587	0.11299	130.284	268.449	36.07± 1.89	45.37	0.35	25.0± 2.0
15WHA0025B-002	3.5 %		0.81963	3.40334	0.15934	167.388	350.639	36.67± 1.23	59.11	0.45	27.5± 2.2
15WHA0025B-003	4.0 %		0.63558	3.54015	0.15792	183.755	386.087	36.78± 1.10	67.22	0.50	29.1± 2.1
15WHA0025B-004	4.5 %		0.65487	4.79156	0.18511	288.525	610.205	37.02± 0.63	75.86	0.78	33.7± 1.8
15WHA0025B-005	5.0 %		0.69999	6.16125	0.21335	356.667	741.697	36.40± 0.56	78.13	0.97	32.4± 1.8
15WHA0025B-006	5.5 %		0.76874	7.69031	0.38710	493.831	1054.974	37.39± 0.53	82.21	1.34	36.0± 1.5
15WHA0025D-001	6.0 %		0.51702	4.31610	0.00000	754.891	1794.784	41.56± 0.45	92.07	2.05	97.9± 9.9
15WHA0025D-002	7.0 %	4	0.95172	12.48628	0.14067	1093.507	2470.361	39.51± 0.48	89.70	2.97	49.0± 2.5
15WHA0025D-003	9.0 %	4	1.60178	42.94399	0.66257	1872.665	4228.629	39.50± 0.48	89.85	5.08	24.4± 0.9
15WHA0025D-004	11.0 %	4	2.43831	46.68131	1.61871	2499.360	5601.810	39.21± 0.47	88.52	6.78	30.0± 1.0
15WHA0025D-005	13.0 %	4	3.42585	44.03029	2.40131	3498.183	7846.827	39.24± 0.45	88.49	9.50	44.5± 1.5
15WHA0025D-006	15.0 %	4	2.57358	34.84346	1.67362	3443.420	7734.114	39.29± 0.46	90.96	9.35	55.3± 1.9
15WHA0025F-001	17.0 %	4	2.02905	28.71874	0.00000	4095.101	9298.728	39.71± 0.42	93.85	11.12	79.9± 2.9
15WHA0025F-002	20.0 %	4	3.90159	64.76987	3.09422	5002.145	11329.602	39.61± 0.43	90.68	13.58	43.2± 1.6

续表2

加热阶段			^{36}Ar(a) [fA]	^{37}Ar(Ca) [fA]	^{38}Ar(Cl) [fA]	^{39}Ar(K) [fA]	^{40}Ar(r) [fA]	视年龄/Ma ±2σ	^{40}Ar(r) /%	^{39}Ar(K) /%	K/Ca±2σ
15WHA0025F-003	25.0 %	4	5.88571	97.38479	7.48374	6958.918	15572.019	39.14±0.46	89.87	18.89	40.0±1.3
15WHA0025F-004	30.0 %	4	3.39525	77.99223	2.54374	5400.930	12227.847	39.60±0.41	92.33	14.66	38.8±1.3
15WHA0025F-005	35.0 %	4	0.53475	19.50041	0.30100	597.177	1351.427	39.58±0.54	89.45	1.62	17.1±0.7
			31.9262	502.16996	21.13537	36836.746	82868.198				

J(照射参数)	结果	^{40}(r)/^{39}(K) ±2σ		年龄/Ma ±2σ		MSWD	^{39}Ar(K) /%	K/Ca±2σ
0.00981622 ± 0.00004908	坪年龄	2.25525	±0.00835 ±0.37%	39.45	±0.42 ±1.05%	0.81 61%	93.55 10	31.1± 8.7
				外部误差	±0.77	1.94	2σ置信区间	
				分析误差	±0.14	1.000	误差放大率	
	总气体年龄	2.24961	±0.00871 ±0.39%	39.35	±0.42 ±1.06%		17	41.1± 0.5
				外部误差	±0.77			
				分析误差	±0.15			

加热阶段			^{36}Ar(a) [fA]	^{37}Ar(Ca) [fA]	^{38}Ar(Cl) [fA]	^{39}Ar(K) [fA]	^{40}Ar(r) [fA]	视年龄/Ma ±2σ	^{40}Ar(r) /%	^{39}Ar(K) /%	K/Ca±2σ
15WHA0026B-003	3.0 %		0.86654	2.62108	0.01269	170.126	237.450	24.61 ± 1.34	48.08	0.35	36.3± 6.8
15WHA0026B-004	3.4 %		0.76747	1.24777	0.00000	168.439	273.083	28.55 ± 1.35	54.59	0.34	75.6± 16.9
15WHA0026B-005	3.8 %		1.98261	5.68783	0.03733	437.812	655.718	26.39 ± 1.05	52.77	0.89	43.1± 2.9
15WHA0026B-006	4.2 %		2.17637	7.50656	0.09366	608.895	950.208	27.49 ± 0.83	59.58	1.24	45.4± 2.6
15WHA0026D-001	4.6 %		2.90526	14.54504	0.12748	959.883	1454.617	26.70 ± 0.71	62.82	1.95	37.0± 1.7
15WHA0026D-002	5.0 %		3.42207	15.06347	0.39913	1461.764	2264.750	27.29 ± 0.60	69.06	2.98	54.3± 2.1
15WHA0026D-003	5.5 %	4	4.54451	33.15492	0.76547	2651.962	4386.404	29.12 ± 0.48	76.48	5.40	44.8± 1.7
15WHA0026D-004	6.0 %	4	5.65588	39.16490	1.20877	3047.881	5117.497	29.56 ± 0.50	75.30	6.21	43.6± 1.6
15WHA0026D-005	6.5 %	4	5.32852	34.10790	1.32271	3159.383	5222.611	29.11 ± 0.47	76.75	6.43	51.9± 1.9
15WHA0026D-006	7.0 %	4	3.73318	33.57538	0.60854	2908.313	4845.572	29.34 ± 0.41	81.36	5.92	48.5± 1.7
15WHA0026F-001	8.0 %	4	3.29312	36.27046	0.00000	3183.789	5349.936	29.58 ± 0.38	84.51	6.48	49.2± 1.8
15WHA0026F-002	10.0 %	4	3.58472	59.31566	1.13800	4048.138	6815.340	29.64 ± 0.39	86.44	8.24	38.2± 1.3
15WHA0026F-003	13.0 %	4	4.47006	98.65875	3.03799	5472.979	9158.280	29.46 ± 0.35	87.29	11.14	31.1± 1.1
15WHA0026F-004	16.0 %	4	4.79961	99.88785	2.91098	5211.687	8760.033	29.59 ± 0.36	85.96	10.61	29.2± 1.0
15WHA0026F-005	20.0 %	4	5.67678	110.09566	4.67810	6692.627	11056.245	29.09 ± 0.34	86.72	13.63	34.0± 1.1
15WHA0026F-006	30.0 %	4	4.45686	128.59410	2.58228	8924.761	14940.129	29.47 ± 0.31	91.78	18.17	38.9± 1.3
			57.663564	719.49734	18.92313	49108.438	81487.871				

J(照射参数)	结果	^{40}(r)/^{39}(K) ±2σ		年龄/Ma ±2σ		MSWD	^{39}Ar(K) /%	K/Ca±2σ
0.00981622 ± 0.00004908	坪年龄	1.67039	±0.00761 ±0.46%	29.41	±0.32 ±1.09%	1.18 31%	92.25 10	37.6±4.8
				外部误差	±0.58	1.94	2σ置信区间	
				分析误差	±0.13	1.0843	误差放大率	
	总气体年龄	1.65935	±0.00675 ±0.41%	29.22	±0.31 ±1.07%		16	38.2±0.4
				外部误差	±0.57			
				分析误差	±0.12			

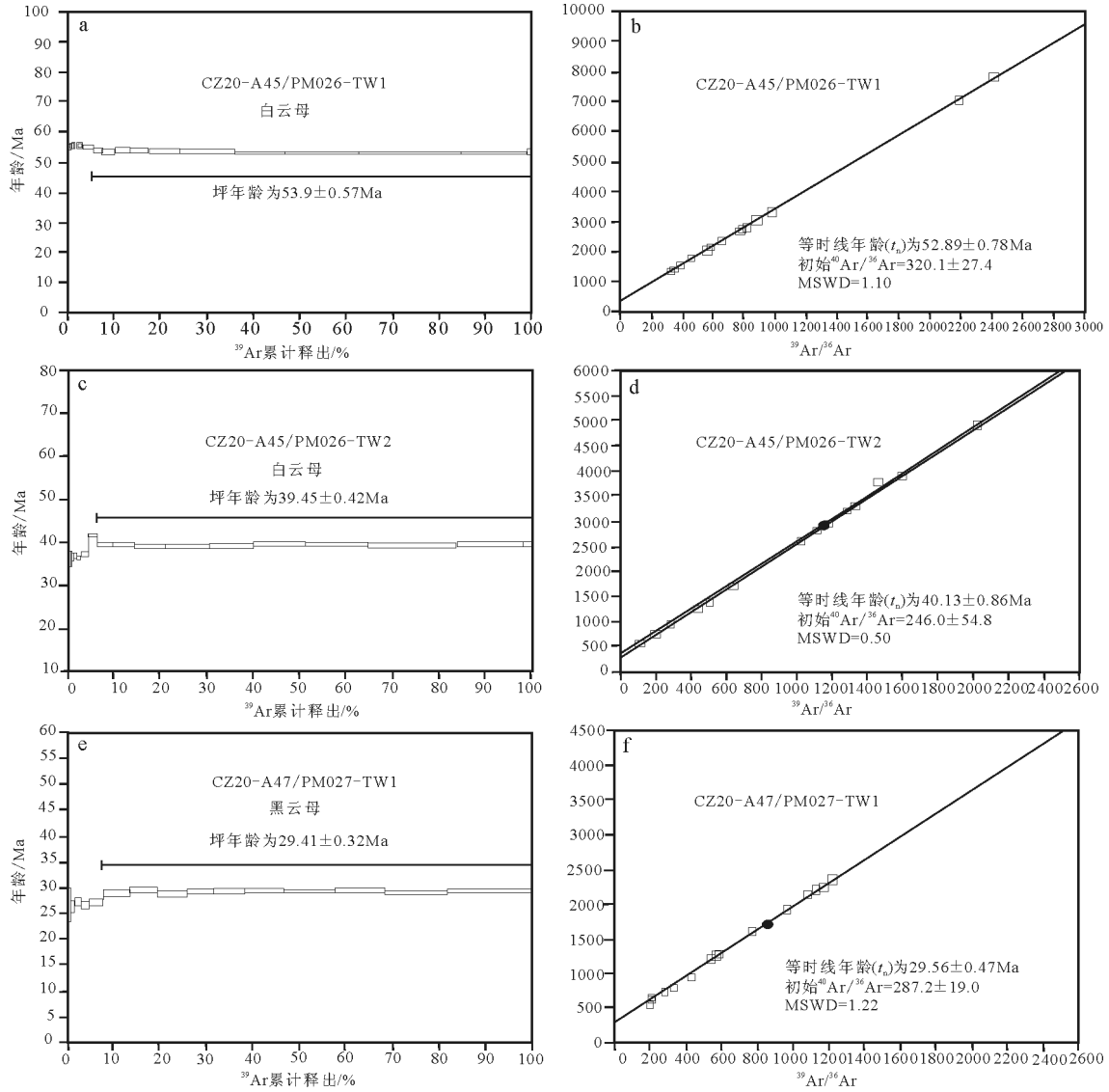


图2　样品$^{40}Ar-^{39}Ar$测年坪年龄谱及等时线年龄

Fig. 2　Age plateau and normal isochron age of three $^{40}Ar-^{39}Ar$ samples

依据萨嘎县牛库地区及区域综合研究成果，现今位于印度与欧亚板块结合部位的仲巴微地体，历经了自晚古生代早二叠世末—早三叠世，从冈瓦纳古大陆北缘初始裂解、向北漂移及在雅鲁藏布江洋盆就位的演化过程，并在晚三叠世以来，作为雅江缝合带西段的次级构造单元之一，共同参与了新特提斯洋的俯冲终结、印度-欧亚大陆碰撞、青藏高原隆升造山运动等复杂的地质构造演化过程。仲巴微地体韧性滑脱剪切带，其初始成因与特提斯洋壳早期向北俯冲、受仲巴微地体阻挡，接触前缘遭受强烈顺层挤压-滑脱-侧向伸展剪切作用相关，是板块俯冲-碰撞背景的产物。通常认为，板块俯冲-碰撞导致的韧性剪切作用的深度一般大于15km，相对应的温度约为500℃[22-25]，而白云母的Ar同位素体系封闭温度（350±50℃）对应的深度为10~12km，因此从韧性滑脱剪切带初始形成到53.39Ma期间，仲巴微地体经历了3~5km的隆升，CZ20-A45/PM026-TW_1样品53.39±0.57Ma的坪年龄记录的是初始韧性剪切作用发生后，降温至350℃左右时的年龄。

近几十年来，地质学家们利用海相沉积、最高海相层位[26-31]、地层古生物[32-33]、古地磁[34-37]、岩石

学[38]、蓝闪石高压变质特征矿物[39]等研究方法，建立不同的运动学模型，从不同的角度对区域上关于印度与欧亚板块碰撞启动的时间给予解释，以对新特提斯洋壳消亡和印度与亚欧板块碰撞时间进行约束。由于对陆陆碰撞定义的不同理解，以及各学科对碰撞约束方法的差异，导致研究者对碰撞启动时间的争论从70~65Ma的晚白垩世[28,37-38,40-43]到30~20Ma的早渐新世—中新世[44-46]不等，至今仍有不少学者将55~50Ma[36,47-48]作为碰撞起始时间。在研究区以西的仲巴县邻区，仲巴北1∶5万四幅区域地质调查项目①利用沉积学、构造古地磁学等研究方法，也得出印度-欧亚大陆初始碰撞时间为50Ma的结论。朱弟成等[40]根据区域上古地磁、地层学、古生物学、岩石学等研究资料指出，两大板块碰撞启动的时间在晚白垩世(70~65Ma)是可信的。该结论目前已被较多研究数据所证明[27-28,30,34-35,37,40,42]，并逐渐占据主流地位。

上述分析阐明，仲巴微地体韧性滑脱剪切带是板块俯冲-碰撞背景的产物，其初始剪切作用的发生与区域印度-欧亚板块碰撞启动的时间直接相关。本文获得的CZ20-A45/PM026-TW$_1$长英质糜棱岩样品白云母53.39±0.57Ma的冷却年龄(剪切活动冷却年龄)，虽在不少地质学家认可的55~50Ma印度-欧亚板块碰撞起始时代区间内，但该测年值记录的仅是地体内高温韧性剪切作用发生，并在高温应力消退、静态恢复重结晶后，低温隆升冷却阶段的白云母年龄，较韧性剪切作用时间相对延后。结合剪切带成因，并与印度-欧亚板块碰撞启动时间对比，笔者认为，53.39±0.57Ma的测年结果可视作仲巴微地体内初始韧性剪切作用发生的下限值(最小年龄)，该剪切带实际初始形成时间应该在53.39±0.57Ma之前的晚白垩世末—始新世初。

因印度-欧亚板块初始碰撞与仲巴微地体韧性滑脱剪切带的形成存在因果关系，两者发生的时间基本一致(构造变形响应较起始碰撞可能存在一定程度滞后)。本次获取的CZ20-A45/PM026-TW1糜棱岩样品白云母$^{40}Ar-^{39}Ar$年龄，从构造地质年代学的角度，佐证了印度-欧亚板块起始碰撞时间应为53.39±0.57Ma之前的晚白垩世末—始新世初。结合本文及区域现有的综合年代成果，笔者更倾向于认为，本韧性剪切带的初始形成及印度-欧亚板块碰撞启动时间应在65Ma左右的晚白垩世末。

5.2 对区域构造运动过程的指示

上述论述表明，仲巴微地体韧性滑脱剪切带，是该地体自53.39±0.57Ma之前的晚白垩世末—始新世初以来，参与印度-欧亚板块碰撞、青藏高原隆升造山等一系列复杂地质构造运动的记录载体，对晚白垩世之后区域多期次构造作用时代、构造运动过程具有重要的指示意义。

本文在剪切带中获取3组云母$^{40}Ar-^{39}Ar$年龄值：53.39±0.57Ma、39.45±0.42Ma、29.41±0.32Ma。其中第1组年龄在上文已进行讨论，代表了牛库地区仲巴微地体韧性滑脱剪切带的形成时间下限；后2组年龄结合区域构造演化背景看，应代表该剪切带形成之后，再次遭受区域叠加的强烈剪切变形热扰动事件之后，冷却阶段的云母年龄。

区域构造演化综合研究主流成果显示，印度-欧亚板块碰撞经历了初始碰撞阶段(早于65Ma)、主碰撞阶段(65~40Ma)和后碰撞阶段(晚于40Ma)[38,40,42,49-50]。本次测试所获的3组年龄值分别是白云母、黑云母形成后，降温至300℃左右(白云母为350±50℃；黑云母为300±50℃)时的冷却年龄，实际对应的剪切作用活动时间是提前的，并分别处于印度-欧亚板块的初始碰撞阶段、主碰撞阶段及后碰撞阶段。由此表明，3组云母$^{40}Ar-^{39}Ar$测年结果约束的仲巴微地体韧性剪切带形成活动时代，与印度-欧亚板块碰撞各阶段时限吻合。

仲巴北1∶5万区域地质调查②对延伸至其工作区范围内的仲巴微地体韧性剪切带，进行了石英、方解石EBSD组构分析。该项目相关成果论文[2]表明，韧性剪切带中典型矿物的变形可分为中高温→中低温→低温时期3个阶段，对应的变形温压环境为高绿片岩相→低角闪岩相→低绿片岩相，结合构造背景，该区韧性剪切带的形成与特提斯洋向北俯冲作用相关，并经历了印度-欧亚板块碰撞、青藏高原差异性隆升阶段，这3次大型的构造活动均造成了该剪切带不同程度的剪切滑动。由此也表明，本文获取的剪切带3组云母$^{40}Ar-^{39}Ar$测年结果，对印度-欧亚板块碰撞阶段及过程的指示，与仲巴北地区通过对同一构造带进行相关微观组构分析后得出的结论可以匹配。

综上所述，本文获取的3组云母$^{40}Ar-^{39}Ar$年龄指示：仲巴微地体韧性滑脱剪切带在53.39±0.57Ma之前的晚白垩世末—始新世初起始碰撞背景下形

成，并在 39.45±0.42Ma 前的主碰撞阶段、29.41±0.32Ma 前的后碰撞阶段，再次叠加了强烈的构造变形改造作用。综合野外调查及印度-欧亚板块碰撞各阶段动力学特征，认为该剪切带经历了初始碰撞阶段、俯冲带前缘强烈挤压、顺层剪切带形成→主碰撞阶段、继承性近南北向挤压收缩、叠加挤压型剪切滑动→后碰撞阶段、青藏高原南部隆升和韧性剪切带再次滑动的运动过程。

6 结　论

（1）仲巴微地体内发育韧性滑脱型剪切带，经历了多期区域构造运动叠加改造的过程。在该带不同变形程度部位的糜棱质岩石样品中，获取了 53.39±0.57Ma、39.45±0.42Ma、29.41±0.32Ma 3 组 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄值，为剪切带遭受不同期次剪切作用之后、低温隆升阶段的（白、黑）云母冷却年龄。

（2）结合区域构造运动事件及动力学背景认为，剪切带形成于 53.39±0.57Ma 之前的晚白垩世末—始新世初、印度-欧亚板块初始碰撞阶段，并在 39.45±0.42Ma 前的主碰撞阶段、29.41±0.32Ma 前的后碰撞阶段，再次叠加了强烈的继承性挤压型剪切滑动过程。

（3）从构造地质及其年代学角度，为区域研究印度-亚欧板块初始碰撞启动时间提供了重要的约束信息，佐证了其起始碰撞时间为 53.39±0.57Ma 之前的晚白垩世末—始新世初期。

致谢：在项目野外调查期间，西藏地勘局刘鸿飞高级工程师、中国地质调查局成都地质调查中心李奋其研究员给予现场指导；在项目实施与研究过程中得到多吉院士，成都地质调查中心齐先茂副主任、王立全研究员，西藏地勘局曾庆高高级工程师及中国地质大学（武汉）张克信教授等的指导与帮助；湖北地质六队杨载熙、刘铭敏、张惠、尤静静等参加了项目野外调查或制图工作；审稿专家提出了宝贵的修改意见及建议，在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

[1]李祥辉，王成善，李亚林，等.仲巴微地体之定义及构成[J].地质学报，2014，88(8):1372 -1381.

[2]商咏梅.西藏南部仲巴微地体脆-韧性剪切带变形特征分析[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文，2015.

[3]潘桂棠，王立全，张万平，等.青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1∶1500000) [M].北京:地质出版社，2013: 1-208.

[4]李亚林，王成善，胡修棉，等.西藏南部始新世早期放射虫动物群及其对特提斯闭合时间的约束[J].科学通报，2007，52(12):1430-1435.

[5]孙高远，胡修棉.仲巴地体的板块亲缘性:来自碎屑锆石U-Pb年代学和Hf同位素的证据[J].岩石学报，2012，28(5):1635-1646.

[6]罗凯，李祥辉，王成善，等.西藏仲巴地区早古生代鹦鹉螺化石的发现及地质意义[J].地质通报，2012，31(4): 36-39.

[7]张振利，专少鹏，李广栋，等.藏南仲巴地层分区才巴弄组变质玄武质火山岩的发现及其意义[J].地质通报，2007，26(4):410-416.

[8]Tullis J，Yund R A. Diffuse creep infeld aggregates:Experimental evidence[J]. J. Struct. Geol., 1991,13(9):987-1000.

[9]Pryer L L.Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone:The Grenville Front, Ontario, Canada[J]. J. Struct. Geol., 1993，15(1):21-36.

[10]Stipp M，Stunitz H，Heilbronner R，et al. The eastern Tonale fauit zone: A natural laboratory for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700℃ [J] J. Struct. Geol., 2002，24(12):1861-1884.

[11]Dodson M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. Contrib. Mineral Petrol., 1973, 40(3): 259-274.

[12]Passchier C W，Trouw R A J. Microtectonics（2nd ed）[M]. Berlin: Springer，2005:57-61.

[13]纪沫，胡玲，刘俊来，等.主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件[J].地学前缘，2008，12: 226-233.

[14]胡玲，刘俊来，纪沫，等.变形显微构造识别手册[M].北京: 地质出版社, 2009: 1-96.

[15]Harrison T M，McDougall I. Excess ^{40}Ar in metamorphic rocks from Broken Hill, New South Wales: implications for $^{40}Ar/^{39}Ar$ age spectra and the thermal history of the region[J]. Earth Planet. Sci. Lett.，1981，55: 123-149.

[16]Harrison T M，Duncan I，McDougall I. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: temperature, pressure and compositional effects[J]. Geochim. Cosmochim Acta，1985，49: 2461-2468.

[17]Hames W E，Bowring S A. An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, 124: 161-169.

[18]Dunlap W J.Neocrystallization or cooling? $^{40}Ar/^{39}Ar$ age of white micas from low-grade mylonites[J].Chem. Geol., 1997, 143(3/4): 181-203.

[19]McDougall I，Harrison T M. Geochronology and Thermochronology by the $^{40}Ar/^{39}Ar$ Method.（2nd ed）[M]. Oxford: Oxford University Press，1999: 269.

[20]陈文，刘新宇，张思红.连续激光阶段升温 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 地质年代测定方法研究[J].地质评论，2002，48(增刊)：127-134.

[21]刘艳红，刘永江. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素测年方法及应用测定方法研究[J].世界地质，2004，23(3):245-251.

[22]Xu Z Q. Large shear zones in the main orogenic belts of China[J].Episodes，1995，18(1/2):41-43.

[23]Hanmer S. Shear zone reactivation at granulite facies:the importance of piutons in the localization of viscous flow[J].Journal of the Geological Society,1997,154(1):111-116.

[24]Whitmeyer S J, Simpson C, Miro R, et al. High temperature,high strain-rate fabrics define a major ductile shear zone in the eastern Sierras Pampeanas,Argentina[C]//GSA Annual Meeting,Boston, Session,2001: 136.

[25]Christine K, Uwe R, Stephanie B, et al. The extensional Messaria shear zone and associated brittle detachment faults,Aegean Sea, Greece[J]. Journal of the Geological Society,2005,162(4):701-721.

[26]Rowley D B. Age of initiation of collision between India and Asia: Areview of stratigraphic data[J]. Earth Planet. Sci. Lett.,1996,145: 1-13.

[27]Willems H,Zhou Z,Zhang B,et al. Stratigraphy of the Upper Cretaceous and Lower Tertiary strata in the Tethyan Himalay as of Tibet(Tingri area,China)[J].Geology Rundsch,1996,85:723-754.

[28]Yin A, Hasrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibet[J]. Orogen Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2000,28:211-280.

[29]Wang C S,L X H,Hu X M,et al. Latest marine horizon north of Qomolangma(Mt Everest):Implications for closure of Tethys seaway and collision tectonics[J].Terra Nova, 2002,14:114-120.

[30]王成善,李祥辉,胡修棉,等. 再论印度-亚洲大陆碰撞的启动时间[J].地质学报,2003,77(1):16-24.

[31]Aitchison J C, Ali J R,Davis A M. When and where did India and Asia collide?[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: B05423: 1-69.

[32]丁林.西藏雅鲁藏布江缝合带古新世深水沉积和放射虫动物群的发现及对前陆盆地演化的制约[J]. 中国科学(D辑),2003,33(1): 47-58.

[33]梁银平,何红卫,朱杰,等.西藏南部古近纪放射虫研究进展[J].地质科技情报,2011,33(3):18-24.

[34]Jaeger J J, courtillot V, Tapponnier P. Paleontological view of the ages of the Deccan Traps, the Cretaceous/Tertiary boundary and the India-Asia collision[J].Geology,1989,17:316-319.

[35]Patzelt A, Li H M, Wang J D, et al. Paleomagnetism of Cretaceous to Tertiary sediments from southern Tibet: Evidence for the extent of the northern margin of India prior to the collision with Eurasia[J]. Tectonophysics,1996,259(4):259-284.

[36]Najman Y. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins[J]. Earth-Science Reviews,2006,74(1/2):1-72.

[37]黄宝春,陈军山,易治宇.再论印度与亚洲大陆何时何地发生初始碰撞[J].地球物理学报,2010,53(9):2045-2058.

[38]莫宣学,赵志丹,周肃,等.印度-亚洲大陆碰撞的时限[J].地质通报,2007,26 (10): 1240-1244.

[39]李才,胡敬仁,翟庆国,等.印度与亚洲板块碰撞及碰撞时限的新证据——日喀则卡堆蓝片岩Ar-Ar定年[J].地质通报,2007,26 (10):1299-1303.

[40]朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等.印度大陆和欧亚大陆的碰撞时代[J].地球科学进展,2004,19(4): 564-571.

[41]Cai F, Ding L, Yue Y. Provenance analysis of upper Cretaceous strata in the Tethys Himalaya, southern Tibet: Implications for timing of India-Asia collision[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2011, 305: 195-206.

[42]莫宣学.岩浆作用与青藏高原演化[J].高校地质学报,2011,17(3): 351-367.

[43]Hu X, Sinclair H D, Wang J, et al. Late Cretaceous-Paleogene stratigraphic and basin evolution in the Zhepure Mountain of southern Tibet: implications for the timing of India-Asia initial collision[J]. Basin Research,2012,24:520-543.

[44]Aitchison J C,Davis A M,Badengzhu B,et al. New constraints on the India-Asia collision: the Lower Miocene Gangrinboche conglomerates, Yarlung Tsangpo suture zone, SE Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2002,21:251-263.

[45]Van Hinsbergen D J J, Lippert P C,Dupont-Nivet G,et al. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2012,109:7659-7664.

[46]White L, Lister G. The collision of India with Asia[J]. Journal of Geodynamics,2012,56:7-17.

[47]Wang J G,Hu X M,Jansa L,et al. Provenance of the Upper Cretaceous-Eocene Deep-Water Sandstones in Sangdanlin, Southern Tibet: Constraints on the Timing of Initial India-Asia Collision[J]. Journal of Geology,2011,119:293-309.

[48]Zhang Q, Willems H, Ding L, et al. Initial India-Asia Continental Collision and Foreland Basin Evolution in the Tethyan Himalaya of Tibet: Evidence from Stratigraphy and Paleontology[J]. The Journal of Geology, 2012,120:175-189.

[49]刘增乾,徐宪,潘桂棠,等. 青藏高原大地构造与形成演化[M].北京:地质出版社,1990:1-174.

[50]莫宣学,赵志丹,喻学惠,等.青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩[M]. 北京:地质出版社,2009:1-396.

①中国地质大学(北京)地质调查研究院.江木那幅、格绒松多幅、岗珠淌幅、穷果公社幅.中华人民共和国区域地质调查报告.2014.

②湖北省地质调查院.牛库幅、达吉岭幅、亚当幅、布扎公社幅. 中华人民共和国区域地质调查报告. 2015.