

# 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局 及形成过程探讨\*

张进江<sup>①\*\*</sup> 季建清<sup>①</sup> 钟大赟<sup>②</sup> 丁林<sup>②</sup> 何顺东<sup>②</sup>

①北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

②中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局主要由两类不同的构造形式组成, 一类为早期韧性挤压、走滑变形体系, 表现为构造结内部的近北向缩短、西边界的左行走滑和东边界的右行走滑, 可能是印度与欧亚大陆碰撞后, 印度大陆向欧亚大陆的楔入所致, 其变形变质峰期为 62~60, 23 和 13 Ma. 另一类则是以南迦巴瓦峰为中心的同心状外倾高角度韧性正断层体系, 可能是后期快速隆升形成的垮塌构造, 正断层作用的开始时代约为 7.3~6.3 Ma.

**关键词** 南迦巴瓦 东喜马拉雅构造结 构造格局 形成过程 构造年代学

印度与欧亚大陆碰撞是新生代最重要的地质事件, 由于其发生时限新, 为研究板块构造机理提供了理想场所, 同时青藏高原的变形、隆升及其对全球环境气候的影响均起始于该大陆碰撞, 所以大陆碰撞汇聚过程是当今青藏高原地质学研究的热点之一. 喜马拉雅是印度与欧亚大陆碰撞形成的全球最年轻造山带之一, 为研究碰撞构造和造山过程提供了有利证据. 东喜马拉雅构造结处于欧亚、印度大陆及缅甸地块的交会点, 是特提斯构造体系正向碰撞和侧向走滑的转换部位<sup>[1]</sup>, 也是喜马拉雅造山带碰撞变形最强烈的地区之一, 具有特殊构造形态和丰富岩石类型, 从而使其成为解决大陆碰撞过程和碰撞效应的关键地区, 引起地质学家们的关注, 并对其进行了较广泛研究<sup>[1-8]</sup>. 但由于条件所限, 该区详细构造格局一直没能详细研究, 形成过程有待于解决. 本文通过对东喜马拉雅南迦巴瓦构造结边缘及内部构造、运动学分析、构造年代学研究, 初步确定了东喜马拉雅构造结的构造格局和形成时代, 并对形成过程进行初步探讨.

## 1 区域地质概况

东喜马拉雅南迦巴瓦构造结位于印度大陆与欧亚大陆碰撞前缘部位, 是喜马拉雅造山带变形最强烈的地区之一<sup>[4,9]</sup>. 碰撞导致的强烈挤压使南部印度大陆向北楔入欧亚大陆, 使雅鲁藏布江缝合带在该地区强烈错位和急剧转折形成拇指状构造结(图 1). 该构造结为由高喜马拉雅高角闪岩相-麻粒岩相正负片麻岩组成的高级变质地体<sup>[10]</sup>, 其内发育高压麻粒岩包体和大量幔源基性、超基性岩. 构造结东、西边界分别由右行走滑的阿尼桥断裂和左行走滑为主的东久-

2002-06-10 收稿, 2002-08-01 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49802020, 49732100, 40172074)及全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(编号: 200022)资助

\*\* E-mail: zhjj@pku.edu.cn

米林断裂限定, 北边界则是嘉黎断裂, 其北、东边界发育白垩纪岛弧沉积形成的缝合带残余. 构造结以西, 南部为冈底斯岛弧岩浆岩带, 北部和构造结以北为石炭纪浅海相沉积, 构造结以东为角闪岩相片麻岩, 可能是冈底斯岛弧系的变质产物<sup>[2,3]</sup>.

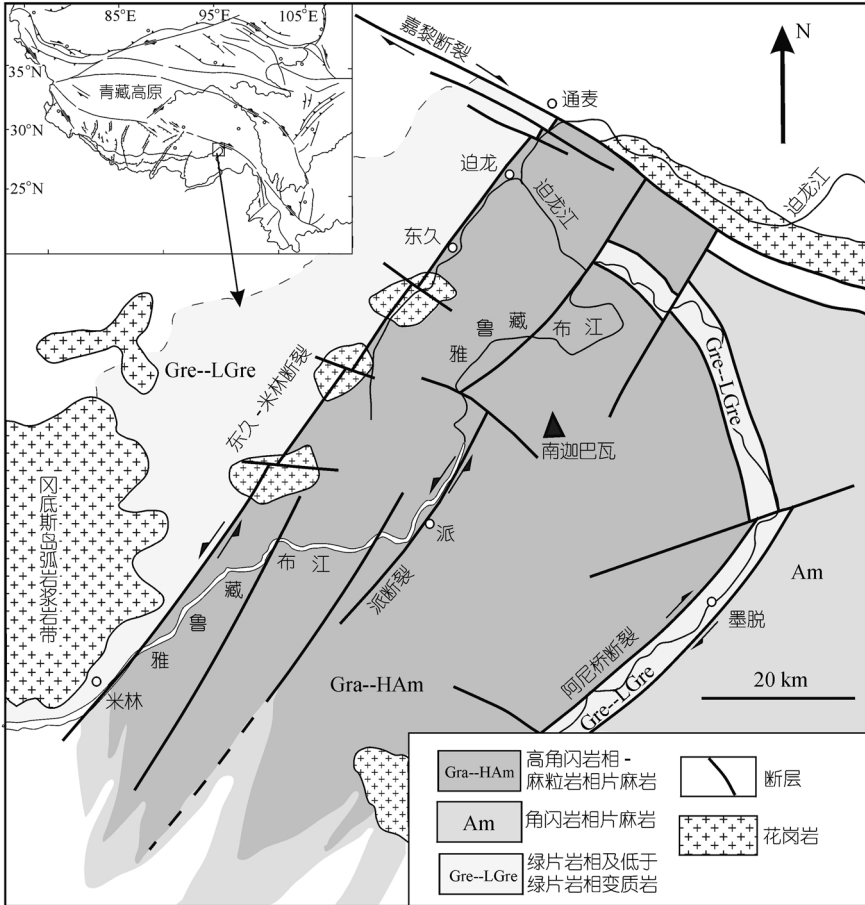


图 1 南迦巴瓦地区东喜马拉雅构造结地质示意图

## 2 南迦巴瓦地区东喜马拉雅构造结边界构造及运动学特征

### 2.1 北边界

南迦巴瓦地区东喜马拉雅构造结北边界较复杂(图 1), 其东部高级变质岩石延伸至嘉黎断裂, 西部是沿雅鲁藏布江白垩纪岛弧沉积残余发育的断裂带, 并被一系列北东走向走滑断裂切割形成不平整边界. 嘉黎断裂为一大型韧性断层带, 自西藏中部的嘉黎延伸至藏东的察隅以南, 向东南可能与三江地区的走滑断层系相连. 在易贡至通麦地区(图 2), 该断裂宽度达 10 km 以上, 大致走向 290°~310°, 断裂带由糜棱岩化花岗岩、片麻岩、大理岩和变质砂岩组成, 糜棱面理倾向南南西, 倾角 40°~85°, 矿物拉伸线理近水平, 在面理面上最大侧伏角为东侧伏 20°(图 2). 不对称眼球构造等运动学标志指示该带为一右行走滑剪切带.

嘉黎断裂南侧发育高角度逆冲(俯冲?)剪切带, 由糜棱岩化石榴石角闪石片麻岩组成, 糜

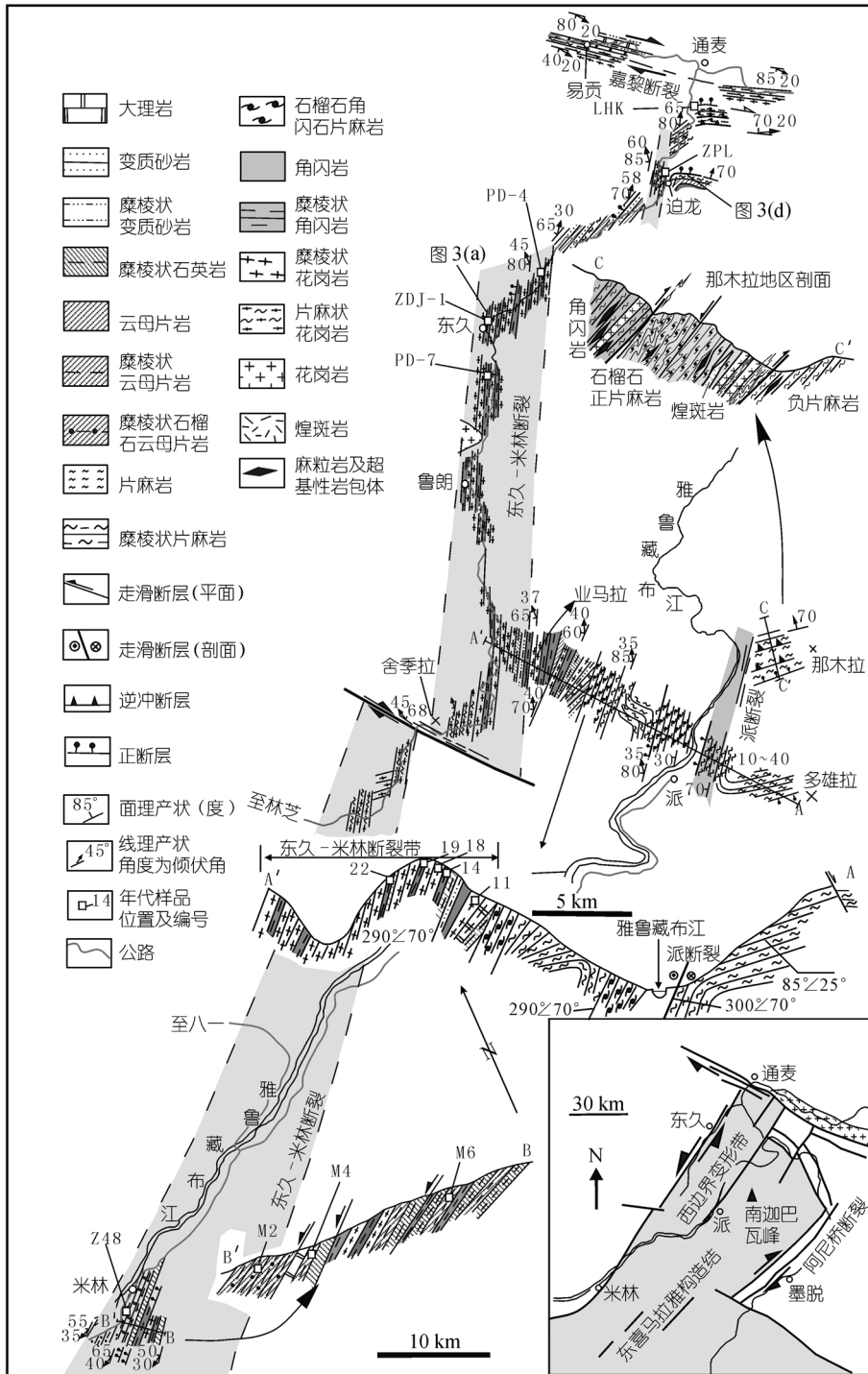


图 2 南迦巴瓦地区东喜马拉雅构造结西边界构造地质图

棱面理产状为  $40^\circ \angle 70^\circ$ ，倾向线理，由石榴石组成的旋转碎斑系指示南盘俯冲(或北盘逆冲)。

该剪切带还叠加了右行走滑构造,形成的糜棱面理产状  $30^{\circ} \angle 70^{\circ}$ , 线理东侧伏  $20^{\circ}$ , 运动学特征与嘉黎断裂相同, 可能是嘉黎断裂对前期缩短构造的叠加.

## 2.2 西边界

东喜马拉雅构造结的西边界为一宽约 20 km 的北东走向变形带, 并将其西北的冈底斯岩浆岩带和东南的高喜马拉雅麻粒岩相片麻岩分割开来(图 1, 2). 整个西边界变形带的岩石组合为糜棱岩化的云母片岩、角闪岩、石英岩、花岗岩和大理岩, 该套岩石组合在鲁朗以北变质以为角闪岩相为主, 间以低角闪岩相-绿片岩相变形带, 自鲁朗向南西变质程度逐渐变浅, 在米林附近变为以低绿片岩相为主夹绿片岩相变形带, 并在米林以南与受强烈挤压的雅鲁藏布带合并. 西边界变形带由一系列强烈变形左行剪切带组成, 其东南边界为派断裂, 该断裂以东构造结内岩层为北西西走向, 在距断层约 2 km 处转为与断层平行的北东走向, 形成断层拖曳构造(图 2); 变形带北西边界为东久-米林断裂, 是带内规模最大变形最强的左行剪切带(图 2).

东久-米林断裂自通麦以南呈  $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$  走向向南西延伸至米林以南(图 1, 2). 该断裂由强、弱变形带相间形成, 强变形带一般宽约 500 m. 自通麦至舍季拉段, 该断裂主要为强烈剪切变形的糜棱状花岗岩和角闪岩组成, 并含糜棱状云母片岩和变质砂岩. 强剪切带内发育透入性剪切面理和矿物拉伸线理(图 3(a)). 面理倾向西北, 倾角  $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$ . 拉伸线理向东北倾伏, 在面

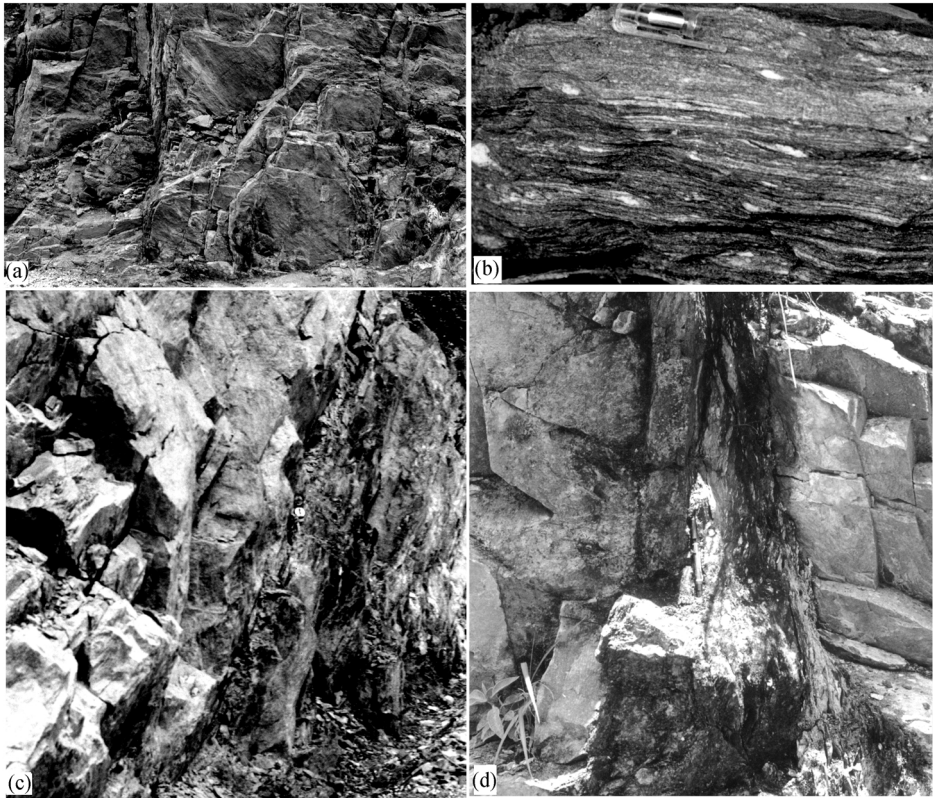


图 3

(a) 东久-米林断裂糜棱状角闪岩及其北东侧伏的线理(位置见图 2, 镜头指向北西); (b) 糜棱状角闪岩中指示左行运动的不对称旋转碎斑构造(地点同(a)); (c) 西边界断裂中发育的后期正断层(地点同(a), 镜头指向北东); (d) 构造结内部的高角度正断层及其内发育的千糜岩(地点见图 2, 镜头指向西)

理上的侧伏角由业马拉附近的北东侧伏  $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$  增至迫龙附近的北东侧伏  $65^{\circ}$  (图 2)。糜棱岩内发育长石旋转碎斑构造(图 3(b))和不对称小褶皱, 运动学指向表示该剪切带为具逆冲分量的左行走滑带, 北西盘为上升盘, 紧邻边界断裂的构造结内部的拖曳构造也证明了这种逆冲左行运动(图 2)。

至米林附近(图 1, 2), 东久-米林断裂的岩石组成主要为糜棱岩化石榴石云母片岩, 夹少量糜棱岩化角闪岩和花岗岩。糜棱面理走向  $30^{\circ}$  左右, 西北倾向, 倾角  $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。值得注意的是, 米林附近矿物拉伸线理产状与该断裂北部北东倾伏不同, 此处线理向南西倾伏, 在面理上主要为南西侧伏  $30^{\circ}$ , 少数可达南西侧伏  $45^{\circ}$ 。糜棱岩中石榴石的旋转构造, S-C 面理关系指示其主要运动性质仍为左行走滑, 但其垂向运动分量上, 西北盘已由北部的上升盘变成了下降盘。这种运动学性质的改变, 是由不同期次变形所致, 还是楔入形成的鳄鱼构造效应, 有待于进一步探讨。

### 2.3 东边界

东喜马拉雅南迦巴瓦构造结东边界为阿尼桥右行走滑断裂<sup>[2]</sup>, 该断裂走向约为  $N30^{\circ}E$ , 根据其变形和变质特征可分为两个带<sup>1)</sup>。西部为拿格断裂, 宽 15 km, 主要糜棱状花岗岩和石榴石黑云母斜长片麻岩组成, 变质变形相相当于低角闪岩相。其内发育透入性面理和线理, 面理倾向南东, 倾角在  $70^{\circ}$  以上, 线理主要由角闪石定向排列形成, 为向北东倾伏的近水平线理, 典型产状为  $35^{\circ} \angle 20^{\circ}$ 。花岗岩中中长石的不对称碎斑系、片麻岩中石榴石雪球构造等运动学标志, 均指示断裂带性质以右旋走滑为主, 兼具南东盘上升的逆冲运动。

东部为马尼翁断裂, 宽约 10 km, 沿北东走向延伸约 150 km, 主要由糜棱岩化的石英岩、云母石英片岩组成, 并夹有低角闪岩相的石榴石黑云角闪片岩, 总体变质程度为绿片岩相<sup>2)</sup>。该套岩石发生强烈糜棱岩化而发育透入性的线理和面理, 面理由云母等矿物定向形成, 走向约  $30^{\circ}$ , 南东倾斜, 倾角约  $62^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 。线理主要由拉伸石英形成, 代表性产状为  $35^{\circ} \angle 30^{\circ}$ 。糜棱岩中发育的小褶曲、S-C 面理、不对称碎斑系及云母鱼等运动学标志指示其为右行剪切带, 同时具有南东盘上升的逆冲运动分量。

总之, 和西边界相同, 东边界亦为一规模巨大的走滑变形带, 但其总体运动学性质为具逆冲性质的右行走滑, 而西边界变形带为具逆冲性质的左行走滑带; 逆冲运动分量上, 西边界北段西盘为上升盘, 相应部位东边界东盘为上升盘; 线理产状上, 东边界的测量位置位于多雄拉以西至墨脱附近(图 1, 2), 其向北东的倾伏角为  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , 西边界与之横向对应的业马拉附近, 线理的北东侧伏角为  $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ , 换算为倾伏角也为  $30^{\circ}$  左右。由此可见, 构造结的东、西边界在构造运动学存在对应性, 可能是夹持中间构造结地块的两边界。

## 3 构造结内部的构造运动学特征

在派以北的东喜马拉雅构造结内部, 构造形态主要表现为逆冲推覆构造体系, 不同逆冲岩片间为倾向北北东的剪切带。多数逆冲剪切带向西合并于西边界变形带, 使西边界断裂形成逆冲体系的侧断坡。在那木拉地区(图 2), 主要由高角闪岩相-麻粒岩相片麻岩组成, 其南部为负片麻岩, 中部为中酸性岩浆岩形成的条带状片麻岩, 北部为中基性岩浆岩形成的斜长角闪片麻岩。三套岩石组成一北北东倾向的逆冲体系, 不同岩石单元间以韧性变形带分割(图 2),

1) 季建清. 青藏高原东南部新生代岩石圈 构造演化、高原隆升及其环境效应. 北京大学博士后出站报告 II, 2000. 50

2) 何顺东. 藏东南迦巴瓦变质岩楔入体东边界阿尼桥断裂带构造变形性质年代学与构造意义. 中国科学院地质与地球物理研究所硕士学位论文, 2001. 45

其中南部负片麻岩与中部条带状片麻岩之间为糜棱状花岗岩形成的宽达 500 m 的大型韧性剪切带, 可能是主构造面. 各剪切带中拉伸线理基本为倾向线理, 不对称眼球构造和小褶曲指示自北北东向南南西的逆冲. 逆冲体系西侧为派断裂, 派断裂带内糜棱面理走向  $30^\circ$ , 矿物拉伸线理和 A 型褶皱枢纽向北东倾伏, 倾伏角为  $35^\circ$ , 与逆冲剪切带线理一致, 运动方式相同. 说明西边界的走滑与构造结内部的缩短运动协调一致, 可能是同时形成的, 即西边界的走滑代表东喜马拉雅构造结的楔入.

## 4 东喜马拉雅构造结后期高角度正断层

南迦巴瓦东喜马拉雅构造结的边界及内部, 除上述韧性走滑及缩短外, 均叠加了后期高角度正断层体系. 在西边界, 这种正断层构造表现为北西倾向、平行或稍陡于糜棱面理的韧性、脆韧性变形带和脆性断层(图 3(c)). 正断层变形带一般厚 10~30 cm, 其内发育糜棱状云母片岩、千糜岩、构造片岩或断层泥, 片岩、千糜岩的矿物线理及断层面上擦痕均顺倾向倾伏. 擦痕阶步、多米诺构造、不对称褶皱、构造片岩片理与断层面的关系以及千糜岩中不对称构造等运动学标志指示断层运动方式为正断下滑, 北西盘为下降盘.

在东边界阿尼桥断裂上, 现今最明显的构造特征为向南东陡倾的正断层构造, 断层产状与走滑形成的糜棱面理近平行, 为  $112^\circ\sim 117^\circ/\angle 62^\circ\sim 68^\circ$ . 正断层表现为韧性、脆韧性和脆性断层, 其中韧性正断层形成的千糜岩变形带叠加在走滑变形糜棱状片岩之上, 变质程度明显比走滑形成的糜棱片岩低. 千糜岩带内发育由石英拉伸和云母定向排列形成的透入性线理, 该线理产状为近倾向, 千糜岩中 S-C 组构和石英岩组图等运动学指向标志指示其运动性质为南东盘下降的正断层<sup>1)</sup>.

在南迦巴瓦构造结的北边界, 由千糜岩组成倾向北北西的正断层剪切带也为该边界最明显的构造特征<sup>2)</sup>.

构造结内部, 逆冲体系之上同样叠加后期高角度正断层, 倾角一般陡于  $70^\circ$ , 断层内发育千糜岩和构造片岩(图 3(d)). 这些断层走向或为东西向, 或为近南北向, 形成由构造结内部向四周倾斜的高角度正断层体系. 总体上, 南迦巴瓦东喜马拉雅构造结边界及内部的高角度正断层形成以南迦巴瓦峰为中心的外倾同心状高角度正断层体系. 而东喜马拉雅南迦巴瓦构造结是一以东、北和西边界变形带限定的麻粒岩-高角闪岩相的高级变质地体, 边界断裂外侧变质程度陡然变低, 如北、西边界外为基本未变质的花岗岩和低级变质的沉积岩, 沉积岩的原生构造清晰可见, 变质程度应低于绿片岩相, 而东边界上则出露低绿片岩相的变质沉积岩(可能是白垩纪岛弧沉积残余). 由此可见, 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结后期可能是由边界变形带正断层围限的一个抬升地体.

## 5 构造年代学分析

为了探讨上述各阶段不同类型变形的时代, 特别是为了通过构造年代学分析, 结合与邻区构造历史的对比探讨东喜马拉雅构造结的形成, 本次研究对西边界早期走滑和后期正断层内的构造岩进行了 Ar-Ar 同位素年代学测定, 14 个分析样品的位置见图 2, 测试样品岩性、测试矿物及结果见表 1 和图 4.

1) 何顺东. 藏东南迦巴瓦变质岩楔入体东边界阿尼桥断裂带构造变形性质年代学与构造意义. 中国科学院地质与地球物理研究所硕士学位论文, 2001, 45

2) 季建清. 青藏高原东南部新生代代岩石圈 构造演化、高原隆升及其环境效应. 北京大学博士后出站报告 II, 2000, 50

表1 南迦巴瓦地区东喜马拉雅构造结边界及内部断层构造岩 Ar-Ar 年龄测试结果<sup>a)</sup>

样品号	位置及岩性	测试矿物	主坪年龄/Ma
ZDJ-1	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	60.60 ± 0.33
ZPL	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	59.21 ± 0.20
14	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	61.99 ± 0.48
19	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	60.46 ± 0.31
PD-7	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	22.69 ± 0.16
PD-4	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	23.13 ± 0.07
11	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状浅色花岗岩	白云母	23.33 ± 0.14
22	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状角闪岩	角闪石	13.28 ± 0.09
18	东久-米林左行走滑带断裂、糜棱状浅色花岗岩	白云母	13.39 ± 0.08
LHK	北边界后期高角度正断层、糜棱状云母片岩	黑云母	6.64 ± 0.04
Z48	西边界后期高角度正断层、千糜岩	绢云母	6.35 ± 0.03
M-2	西边界后期高角度正断层、糜棱状云母片岩	白云母	7.29 ± 0.07
M-4	西边界后期高角度正断层、糜棱状云母片岩	黑云母	6.43 ± 0.05
M-6	西边界后期高角度正断层、糜棱状云母片岩	黑云母	6.60 ± 0.05

a) 样品由中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 法定年实验室. 测定仪器: RGA-10 气体源质谱仪.  $K$  为衰变常数,  $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/a$

西边界岩石组合向南西变质程度变浅, 并与雅鲁藏布江带相连, 所以西边界可能是大陆间强烈变形变质产物, 野外及室内分析均证明, 边界走滑断裂及后期正断层中测试矿物分别为走滑和正断作用时期形成的同变形变质矿物, 故此以上数据具有构造意义.

由上述数据可以看出, 西边界变形带后期的正断层作用时代为 7.3~6.3 Ma, 而前期的走滑可分为 3 个时段, 分别为 62~59, 23 和 13 Ma. 在构造结东边界上, 早期走滑糜棱岩中的云母 Ar-Ar 年龄分别为 23 和 13 Ma 左右, 后期正断层千糜岩绢云母的 Ar-Ar 年龄为 6.4~6.9 Ma<sup>1)</sup>. 由于采样的变形域、测试矿种类和样品数量等原因, 东边界没有测试到 60Ma 左右的时代, 但其后三期的年代与西边界具有很好的对应性. 所测年代数据与具体构造体系的关系上, 正断层体系与 7.3~6.3 Ma 的年代数据有很好的对应性, 但在走滑变形域中, 三期构造年代与具体构造体系对应不十分清晰. 然而, 60 Ma 的样品均采自角闪岩相变形域, 约 23 Ma 和~13 Ma 的样品则取自低角闪岩相和绿片岩相变形域, 所以边界变形带中不同变质程度的变形域可能为不同期变形形成. 另外, 滇西哀牢山红河构造带与东喜马拉雅构造结同属于新特提斯构造域, 该构造带早期为韧性左行走滑, 并可明确划分为不同层次、不同机制的三期变形. 其各期走滑同变形变质矿物(角闪石、黑云母、白云母和绢云母)的 Ar-Ar 年代分别为 58~56, 23 和 13 Ma<sup>[11]</sup>, 与南迦巴瓦构造结三期变形相对应, 可能是在印度与欧亚大陆碰撞同一体制下形成的三期具有区域意义的构造事件, 所以我们认为南迦巴瓦构造结边界走滑带中三组年代数据代表了三期具有区域构造地质意义的事件.

## 6 形成过程讨论

构造分析表明, 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结内部及边界断裂均经历了前后两类不同性质

1) 何顺东. 藏东南南迦巴瓦变质岩楔入体东边界阿尼桥断裂带构造变形性质年代学与构造意义. 中国科学院地质与地球物理研究所硕士学位论文, 2001. 45

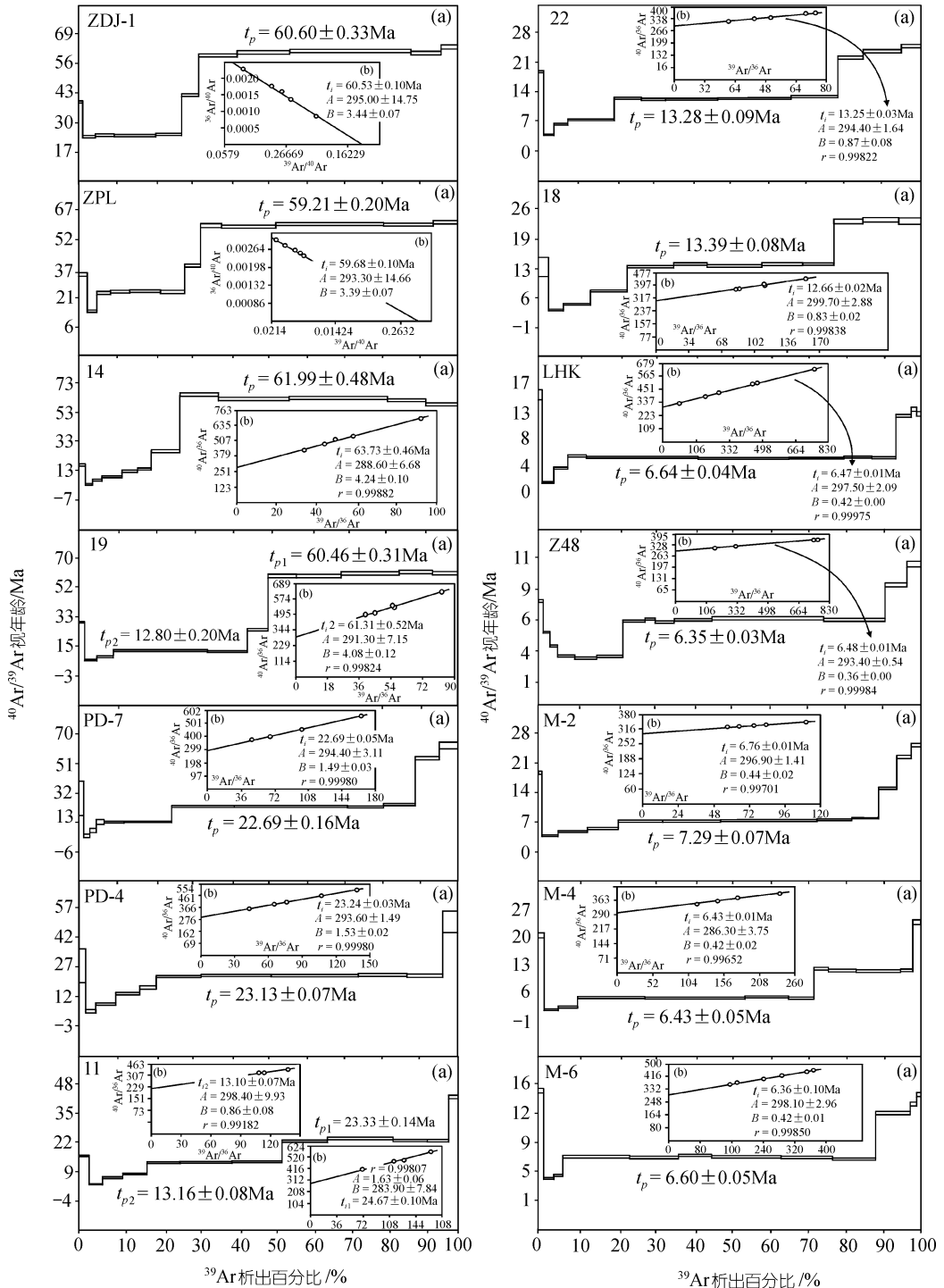


图 4 南迦巴瓦地区东喜马拉雅构造结构构造岩 Ar-Ar 年龄谱(a)和等时线(b)  
 $t_p$  为坪年龄,  $t_i$  为等时线年龄;  $A$  示  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  初始比,  $B$  示等时线斜率,  $r$  示等时线拟合度



的构造运动. 西边界断裂早期为具逆冲性质的韧性左行走滑, 后期为北西盘下降的韧-脆性正断层作用, 东边界早期为韧性右行走滑, 后期为南东盘下降的高角度韧-脆性正断层作用. 构造结内部早期为北北东向韧性缩短, 后期为向四周的韧-脆性正断层.

对于早期韧性变形, 从平面构造几何及运动学关系看, 边界断裂走滑分量与构造结内部逆冲方向相反, 因此被认为是两期构造所致<sup>[10]</sup>. 但三维运动学分析表明, 西边界断裂北部早期北东倾伏的运动线理与构造结内部的逆冲运动线理一致, 如果将构造结内部逆冲构造体系视为南部板片向北的俯冲, 则边界的走滑和内部的缩短运动就会形成统一的构造运动体系, 并将边界走滑断裂视为构造结收缩构造的侧断坡(图5). 在米林附近, 东久-米林断裂上线理倾伏方向发生了变化, 由北部的北东倾伏变为此区的南西倾伏, 而此区构造结内部则是由南南西向北北东的逆冲, 所以边界及内部在运动学上也是和谐一致的.

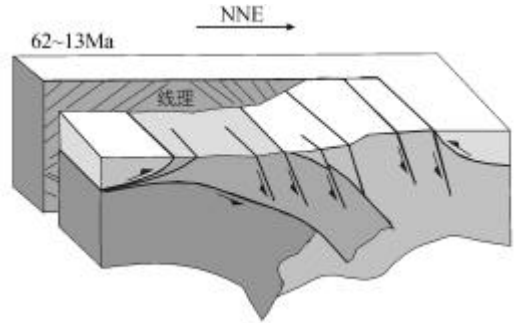


图5 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结早期楔入过程示意图

东喜马拉雅南迦巴瓦构造结内部缩短和边界走滑运动一致, 可能是同时形成的同一构造体系; 边界的走滑是印度大陆(构造结内高喜马拉雅岩系)和欧亚大陆(冈底斯岛弧岩浆岩系)间的走滑; 西边界岩石组合向南西变质程度变浅, 并与雅鲁藏布江带相连; 东边界变形带发育雅鲁藏布江缝合带的残余, 所以构造结的东、西边界可能是大陆间强烈变形产物. 因此东喜马拉雅南迦巴瓦构造结为大陆间的楔入构造, 构造结内部的缩短代表印度与欧亚大陆碰撞后, 印度大陆向欧亚大陆的楔入, 边界的走滑代表楔入的边界调节(图5). 至于西边界变形带南、北部线理的变化, 可能代表楔入形成的鳄鱼构造(图5).

在构造年代学方面, 由于西边界的变形变质事件是两大陆间的走滑所致, 故此 62~59 Ma 的变形变质事件可能代表印度与欧亚大陆的初期碰撞. 业已证明西喜马拉雅构造结碰撞开始于 60 Ma 左右<sup>[12-15]</sup>, 同时许多学者认为碰撞由西向东依次进行的, 东构造结晚于西构造结<sup>[16-19]</sup>, 但丁林和钟大赟<sup>[6]</sup>证明东构造结陆壳高压麻粒岩的峰期变质年龄为 60 Ma 左右, 说明当时此区已开始陆壳俯冲. 而在 23 Ma 左右, 青藏高原处于一个变形高峰期, 其中包括 MCT 的活动和印支地块的挤出<sup>[9,15,20,21]</sup>. 至于 13 Ma 的事件, 可能代表一次强烈挤压, 因为在青藏高原及周围在此时期处于一个挤压期<sup>[22]</sup>, 同时高原内部开始出现东西向伸展<sup>[23,24]</sup>, 这种伸展可能是强烈挤压的变形分解<sup>[25]</sup>.

东喜马拉雅构造结后期构造表现为以南迦巴瓦峰为中心外倾同心状高角度韧脆性正断层体系, 可能是快速隆升的垮塌构造.

南迦巴瓦构造结主要由麻粒岩-高角闪岩相正、负片麻岩组成, 并出露大片的石榴石兰晶石高压麻粒岩, 其中部分高压麻粒岩原岩为沉积岩, 这些麻粒岩经历了 750~850℃和 1.4~1.8 GPa 的峰期变质(时代约 60 Ma), 为印度大陆深俯冲成因<sup>[6,10]</sup>. 如此高强度的变质岩现今出露于地表, 说明其后期经历了快速的隆升.

构造结内片麻岩中广泛发育脉状煌斑岩-碳酸岩组合侵入岩, 角闪石 Al 压力计指示结晶压力条件为  $(2.76\sim 3.86) \times 10^8$  Pa, 由此推算其侵位的地壳深度为 9.72~13.59 km, 云母、角闪石

Ar-Ar 年龄为 7~6 Ma. 岩脉的结构体现了快速结晶的特点, 可以认为岩脉中角闪石 Al 压力计的封闭与黑云母、金云母、角闪石的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  系统的封闭计时是同时的. 可以推算, 构造结在约 7~6 Ma 以来已有约 12 km 厚的地壳被剥蚀, 剥蚀速率可达  $1.75 \text{ mm/a}^{[1]}$ .

由此可以看出, 南迦巴瓦构造结在上述脉岩侵位(7~6 Ma)以来经历了快速的剥蚀-隆升, 而整个青藏高原在~8 Ma 开始快速隆升并达到最大高度<sup>[21,26]</sup>, 同时越来越多的证据证明东亚的气候在 8~6 Ma 以来发生了急剧变化<sup>[27~29]</sup>, 所以东喜马拉雅南迦巴瓦构造结 7~6 Ma 以来快速剥蚀-隆升是整个青藏高原快速隆升的具体表现. 而南迦巴瓦地区后期高角度正断层体系的活动年代为 7.3~6.3 Ma, 该正断层体系可能是东喜马拉雅构造结快速抬升的产物, 即快速隆升导致的一种垮塌构造.

另外, 从变质程度看, 南迦巴瓦构造结的隆升程度比周缘要大, 这可能与气候急剧变化引起快速剥蚀而产生均衡有关<sup>[30]</sup>. 但本区现今呈现高地热状态并在 18 km 以下存在柱状软流体<sup>[31]</sup>, 而在 7~6 Ma 隆升发生时本区广泛发育幔源岩浆岩, 从一个地幔过程的时间尺度和当时的幔源岩浆的活跃程度看, 地幔上隆可能是本区快速隆升的一个关键因素. 这与本区处于特殊构造位置有关, 本区处于喜马拉雅造山带挤压最强的地区, 强烈的俯冲和缩短使本区岩石圈增厚, 使其下部处于极高压状态而形成高压麻粒岩, 并产生岩石圈与软流圈密度倒转而诱发拆沉作用. 拆沉引起岩石圈重力反弹, 软流物质补充拆沉空间, 加剧了东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的隆升.

**致谢** 感谢论文评审人为改进本文提出的宝贵而有建设性的意见和建议.

## 参 考 文 献

- Holt W E, Ni J F, Wallace T C, et al. The active tectonics of the eastern Himalayan Syntaxis and surrounding regions. *J Geophys Res*, 1991, 96: 14595~14632
- 郑锡澜, 常承法. 雅鲁藏布江下游地区地质构造特征. *地质科学*, 1979, (2): 116~126
- 张振根, 刘玉海, 王天武, 等. 南迦巴瓦峰地区地质. 北京: 科学出版社, 1992. 187
- 丁 林, 钟大赟, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 1995, 40: 1497~1500
- Ratschbacher L, Frisch W, Chen C, et al. Cenozoic deformation, rotation, and stress patterns in eastern Tibet and western Sichuan, China. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The tectonic evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press, 1996. 227~249
- 丁 林, 钟大赟. 西藏南迦瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(4): 385~397
- Zhang J, Zhong D, Ding L, et al. Deformation of the eastern Himalayan Syntaxis: evidences from structures and kinematics of its western boundary. *地学前缘*, 2000, 7(suppl.): 18~20
- 王二七, Burchfiel B C, 季建清. 东喜马拉雅构造结新生代地壳缩短量的估算及其地质依据. *中国科学, D 辑*, 2001, 31: 1~9
- 钟大赟, 丁 林. 青藏高原隆起过程及其机制探讨. *中国科学, D 辑*, 1996, 28: 289~295
- Liu Y, Zhong D. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis. *J Metamorphic Geol*, 1997, 15: 451~466
- 张进江, 钟大赟, 季建清, 等. 东喜马拉雅构造结大陆碰撞以来构造年代学框架及其与哀牢山红河构造带的对比. *矿物*

1) 季建清. 青藏高原东南部新生代岩石圈构造演化、高原隆升及其环境效应. 北京大学博士后出站报告 II, 2000. 50

- 岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 243~244
- 12 Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, et al. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia. *Nature*, 1995, 373: 55~57
  - 13 Rowley D B. Age of initiation of collision between India and Asia: a review of stratigraphic data. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 145: 1~13
  - 14 Chung L-S, Lo C-H, Lee T-Y, et al. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 1998, 394: 769~773
  - 15 Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211~280
  - 16 Dewey J F, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone. *Eclogae geol Helv*, 1989, 82: 717~734
  - 17 Treloar P J, Rex D C, Guise P G, et al. K-Ar and Ar-Ar geochronology of the Himalayan collision, deformation, metamorphism and uplift. *Tectonics*, 1989, 8: 881~908
  - 18 Zeitler P K, Chamberlain C P, Smith H A. Synchronous anatexis, metamorphism, and rapid denudation at Nanga Parbat (Pakistan Himalaya). *Geology*, 1993, 21: 347~350
  - 19 Searle M P. Cooling history, erosion, exhumation, and kinematics of Himalaya-Karakoram-Tibet orogenic belt. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The tectonic evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press, 1996. 109~137
  - 20 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet. *Science*, 1992, 255: 1663~1670
  - 21 Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 1990, 343: 431~437
  - 22 张进江, 钟大赉, 周 勇. 东南亚及哀牢山红河构造带构造演化的讨论. *地质论评*, 1999, 45: 337~344
  - 23 Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr age from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 1995, 374: 49~52
  - 24 Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, et al. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago. *Nature*, 2001, 412: 628~632
  - 25 张进江, 郭 磊, 丁 林. 申扎-定结正断层体系、南段构造特征及其藏南拆离系的关系. *科学通报*, 2002, 47: 738~743
  - 26 An Z H, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62~66
  - 27 安芷生, 王苏民, 吴锡浩, 等. 中国黄土高原的风积证据: 晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动. *中国科学, D辑*, 1998, 28: 481~490
  - 28 孙有斌, 安芷生. 最近 7 Ma 黄土高原风尘通量记录的亚洲内陆干旱化的历史和变率. *中国科学, D辑*, 2001, 31: 769~776
  - 29 李保华, 翦知潜. 南沙深海近 10Ma 来浮游有孔虫群及海水温跃层演变. *中国科学, D辑*, 2001, 31: 840~845
  - 30 Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? *Nature*, 1990, 346: 29~34
  - 31 袁学诚. *中国地球物理图集*. 北京: 地质出版社, 1996. 1~200