

文章编号: 1006-6616 (2004) 03-0193-20

青藏高原北缘阿尔金东段 中生代南北向伸展作用

陈宣华¹, An Yin², George E. Gehrels³, Eric S. Cowgill²,
Marty Grove², T. Mark Harrison², 王小凤¹, 杨农¹, 刘健¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. Department of Earth and Space Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics,
University of California, Los Angeles, CA 90095-1567;

3. Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721)

摘要: 青藏高原北缘的阿尔金山脉东段发育了延伸大于 300 km、东西走向的拉配泉断裂, 为南倾的正断层, 局部倾角可以低至 30°以下。断层中段表现为 30 ~ 50 m厚的韧性剪切带, 发育有较好的糜棱岩组构和矿物伸展线理; 东段和西段以碎裂变形为特征。断裂带内运动学标志, 如不对称香肠构造、不对称褶皱和次级脆性和韧性断裂, 都指示了上盘向南的正滑移剪切方式。两方面证据控制了拉配泉断裂的活动时代。首先, 拉配泉断裂上盘局部产出早-中侏罗世沉积地层。侏罗系地层中的砾石, 特别是其中的含叠层石硅质灰岩和紫色石英岩, 可以与断裂下盘的岩石相对比。早-中侏罗世地层可能为拉配泉断裂之上的伸展盆地沉积。其次, 拉配泉断裂下盘岩石的⁴⁰Ar/³⁹Ar热年代学分析给出 2 个明显的冷却事件。较老的事件出现在约 220 ~ 187 Ma 之间的三叠纪末期至侏罗纪早期, 而年轻的事件出现在早白垩世的晚期 (约 100 Ma)。约 220 ~ 187 Ma 之间的冷却年龄在拉配泉断裂下盘岩石中普遍存在, 代表了拉配泉断裂正断作用的主要阶段。约 100 Ma 时, 断裂东段的正断作用再次活动, 该事件可能被南倾的恰什坎正断层运动所叠加而增强, 并与拉配泉断裂的东段合并。这 2 条断裂具有共同的上盘向南的正滑移运动方式。青藏高原和东亚其它地区的中生代伸展作用可以归结为特提斯洋向北和太平洋向西俯冲形成的弧后伸展作用。

关键词: 青藏高原; 阿尔金山; 伸展构造

中图分类号: P542⁺.31

文献标识码: A

如何确定印度-亚洲碰撞在青藏高原生长过程中的作用, 其最大问题是需要剔除该地区普遍存在的古生代和中生代变形效应^[1,2]。由于青藏高原古生代和中生代地质历史还没有很

收稿日期: 2004-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40342015) 与美国国家科学基金委员会大陆动力学计划资助项目。

作者简介: 陈宣华 (1967-), 男, 博士, 研究员, 主要从事构造地质学与岩矿及地球化学研究工作。E-mail: xhchen @

cags. net. cn

好地建立, 新生代高原发育机制的确定遇到了很大困难。过去认为, 青藏高原地区显生宙构造演化过程中占统治地位的是微大陆和弧地体在亚洲南缘的连续增生导致的收缩变形^[3~5]。亚洲南缘的这些碰撞事件被认为影响了塔里木和天山地区的盆地发育, 并产生了许多大的与俯冲有关的陆内盆地^[6,7]。但是, 青藏高原腹地羌塘地块发现的中生代含蓝片岩拆离断层系, 突出了中亚地质格架重建中伸展构造的重要性^[8]。特别地, 青藏高原中部中生代伸展作用对印亚碰撞过程中新生代地壳缩短和岩浆作用的定位可能起着关键作用^[9]。前新生代构造历史在控制印亚碰撞过程中青藏高原形成的运动学和动力学方面起着决定性的作用^[10]。首先, 先存缝合线是南北向收缩作用定位的地方。其次, 碰撞带的速度场(即南北缩短对向东挤出)对重力势(表现为先存地貌)非常敏感。本文根据近年来取得的有关研究结果^[11,12], 报道了青藏高原北缘阿尔金山脉东部中生代大型南倾伸展断裂系的发现(图1)。根据最新的U-Pb 锆石和⁴⁰Ar/³⁹Ar热年代数据, 结合野外区域地质观测, 提出了青藏高原北缘具有2期中生代伸展断裂作用, 一期发生在晚三叠世至早侏罗世, 另一期在早白垩世。

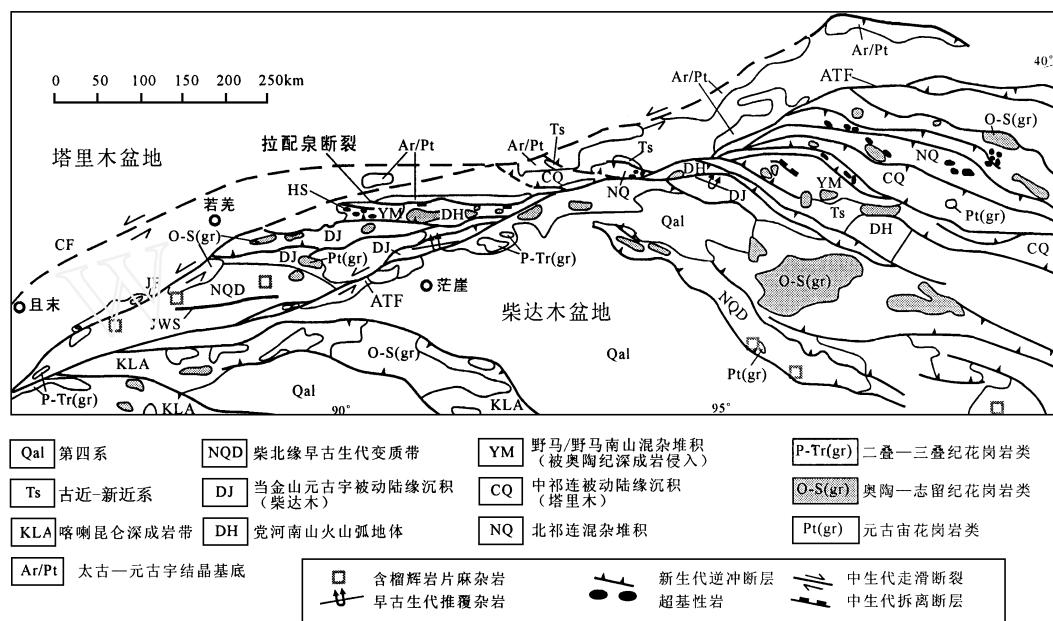


图1 阿尔金山东段和祁连山地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the eastern Altyn Tagh Range and Qilian Mountains

CF, 车尔臣断裂; ATF, 阿尔金断裂; JF, 江孜勒萨依断裂; HS, 红柳沟缝合线; JWS, 江孜勒萨依-瓦石峡缝合线

1 阿尔金山地质概况

阿尔金山脉把其南边的青藏高原与北边的塔里木盆地分割开来(图1)。在晚新生代区域构造格架中, 阿尔金地块整个地处在活动的左行走滑阿尔金断裂的北边^[13]。

阿尔金山北缘由太古宇和元古宇片麻岩组成(图1、图2)^[14,15]。元古宇含叠层石沉积序列, 主要为厚层石英岩和硅质灰岩, 出现在区域中部和西部^[14]。早古生代火山岩夹海相沉积岩只出现在阿尔金山脉的东部, 而阿尔金山西段主要为由大理岩、片岩和长英质片麻岩组成的变沉积岩类^[14]。阿尔金山西段片麻岩变质程度局部达到麻粒岩相(图1)^[16]。本区晚古

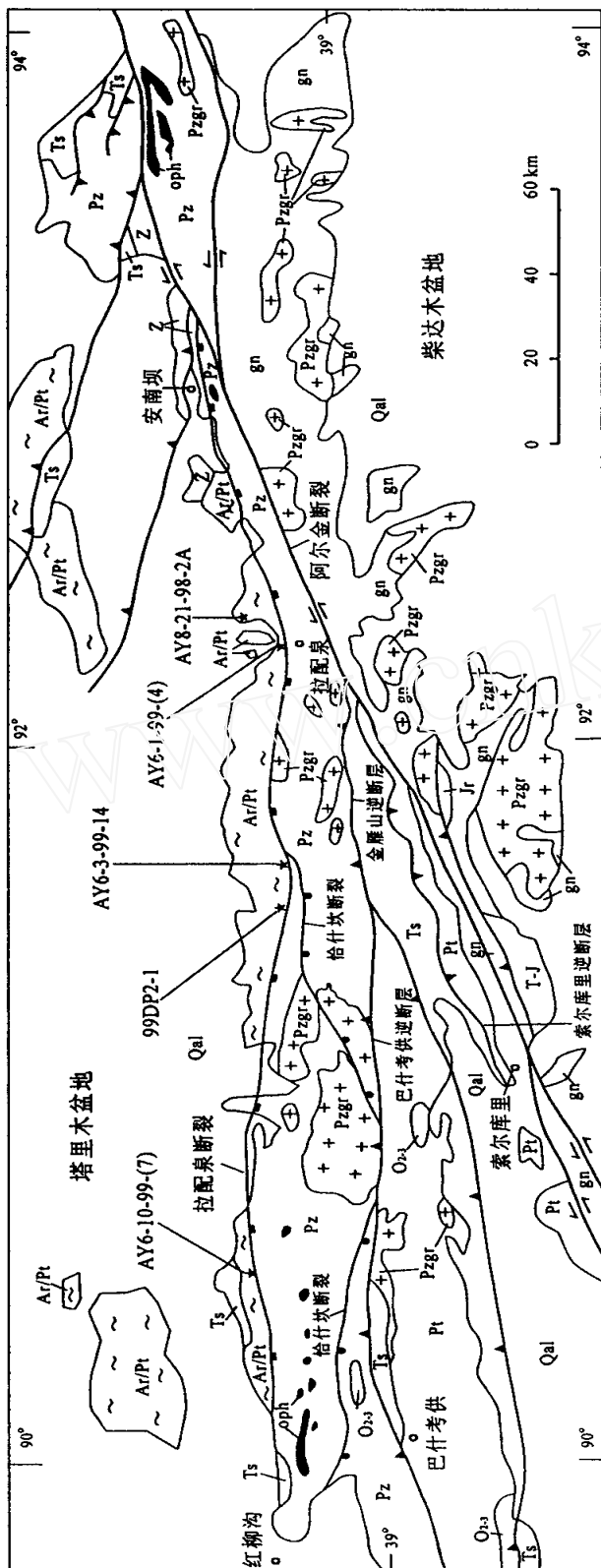


图2 阿尔金山东段地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the eastern Altyn Tagh Range

Qal, 第四纪冲积沉积; Ts, 古近-新近系红层, 主要为晚始新世-早渐新世沉积; Ir, 侏罗系; T-J, 三叠系-侏罗系; P₂, 早古生界火山-海相沉积岩系, 主要为奥陶系和志留系; O₂₋₃, 中-上奥陶统灰岩和硬砂岩; Pzgr, 早古生代花岗岩类; Z, 拉配泉断裂下盘的新元古代浅海相石英岩和硅质灰岩; Pt, 拉配泉断裂上盘元古宙含叠层石灰岩、大理岩、片岩和石英岩; gn, 阿尔金断裂南侧长英质片麻岩; Ar/Pt, 拉配泉断裂下盘太古宙-元古宙片麻岩, 可能代表塔里木盆地的基底; oph, 蛇绿岩。东西走向的古近-新近纪索尔库里和金雁山逆冲断裂系均被 ENE 走向的阿尔金断裂所切过。恰什坎断裂被金雁山-巴什考供逆冲断裂系切过, 并与拉配泉断裂合并; 2 条断裂的交会处(点 A)把拉配泉断裂分成了东、西 2 段, 其中东段在早白垩世末期再次活动, 与同时期活动的恰什坎断裂具有运动学上的联系。★99DP2-1, 样品采集位置及样品号

生代地层比较少,出露的泥盆系地层为典型的硅质碎屑沉积,石炭系为浅海沉积^[14]。侏罗系含煤陆相沉积在本区零星分布。

阿尔金山东段新生代变形主要表现为几条东西走向的古近-新近纪逆冲断裂,构成晚始新世-早渐新世盆地的边界,并被阿尔金断裂所切割(图1)^[9]。阿尔金山西段的北部边界为江孜勒萨依断裂(ENE走向,左行走滑),它与阿尔金山东段东西走向的古近-新近纪逆冲断裂可能具有运动学联系^[9,17]。

阿尔金山地区存在2条东西走向的缝合带:东边为红柳沟缝合线,西边为江孜勒萨依缝合线^[9,15,16,18~21]。缝合线的位置一般由零星分布的榴辉岩和超基性岩碎片来确定。不过,这2条缝合线侧向上不连续,其范围和延伸都不是十分清楚。沿红柳沟缝合线,在靠近巴什考供的一个小的局部区域内出露有数个超基性岩小透镜体(图2)^[14]。超基性岩出露为构造岩片,经断裂作用叠覆在高级片麻岩($T = 550 \pm 30$, $p = 1.4 \sim 2.0$ GPa)、枕状熔岩、硅质岩、大理岩、复理石和局部的火山碎屑角砾岩之上^[18,20]。枕状熔岩和复理石建造被早古生代深成岩所侵入(图2)。由于超基性岩碎片完全被断裂作用所变形,且露头非常有限,因此,这些缝合线究竟分割了哪个构造板块(如华北、塔里木、柴达木或祁连地块),以及它们向东和向西究竟怎样延伸,并不清楚^[1,21]。

红柳沟缝合带内高级片麻岩中白云母给出 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄为 575 ± 3 Ma和 573 ± 6 Ma,并被解释为代表了塔里木地块南缘北向俯冲和构造增生过程中的一次剥露事件^[15]。阿尔金山中段茫崖-若羌公路沿线和阿尔金东段拉配泉附近一条南北向剖面上片岩、片麻岩和变形花岗闪长岩中白云母和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄,属于晚奥陶世-早志留世(图1)^[21]。该冷却事件可能是塔里木地块碰撞和逆冲推覆到南边的大陆弧之上引发的^[21]。这与较早的解释^[15,18]在许多方面相似。不过,由于奥陶纪和志留纪深成岩很普遍^[22],该冷却年龄很大程度上反映的是深成岩定位的时代。实际上,阿尔金山东段的冷却历史比起以前预想的要复杂得多。在奥陶纪冷却历史之外,白云母、黑云母和钾长石的侏罗纪和白垩纪冷却年龄也很普遍。本文建立的构造格架将逐步揭示这些年龄数据的地质意义。

与以上将红柳沟缝合线解释为早古生代的观点相反,有人认为该缝合事件出现在新元古代,并给出红柳沟超基性岩和基性岩中辉长岩和玄武岩的Sm-Nd等时线年龄为 829 ± 60 Ma(辉长岩)和 949 ± 62 Ma(辉长岩和玄武岩),认为这2个年龄值与红柳沟地区洋盆封闭时间最为接近,并进一步推测红柳沟缝合线向西延伸并穿过塔里木盆地,将塔里木地块分成南、北两块^[23]。该方案可能有助于解决与塔里木地块定年有关的突出构造问题。

阿尔金山地区另一条推测的缝合线是江孜勒萨依-瓦石峡带(图1),以超基性岩碎片和含榴辉岩高级片麻岩杂岩体^[19]的出现为特征。榴辉岩形成条件为 $p = 1.40 \sim 1.85$ GPa和 $T = 660 \sim 830$ ^[19],或者 $p = 1.1 \sim 1.4$ GPa和 $T = 670 \sim 800$ ^[16]。榴辉岩全岩-石榴子石-绿辉石Sm-Nd等时线年龄为 500 ± 10 Ma,锆石U-Pb年龄为 504 ± 5 Ma^[16],它们被解释为阿尔金西段缝合作用的年龄。与红柳沟缝合线的问题相类似,目前还不清楚江孜勒萨依缝合线如何在新生代塔里木盆地之下向西延伸。

2 拉配泉正断层体系的地质特征

青藏高原北缘的阿尔金山东段出露有一条明显的大断裂——拉配泉断裂^[24],它将太古宙-元古宙片麻岩(图2中Ar/Pt单元)及新元古代浅海相地层(图2中Z单元)与古生界火

山沉积岩系（图 2 中 Pz 单元）分开^[14,25]。该断裂西起红柳沟（ $\sim 90^\circ E$ ），东至安南坝（ $\sim 93^\circ E$ ），东西延伸大约 300 km（图 1）。拉配泉断裂的东端被阿尔金断裂所切断，往西延伸被塔里木盆地的第四系沉积所覆盖（图 2）。先前的 1:20 万地质图中，拉配泉断裂被填成北倾的逆冲断层，将塔里木基底的太古宙-元古宙片麻岩推覆在古生代火山-沉积岩系之上。但是，地质填图和剖面构造观测说明，这是一条南倾的正滑移断层。下面分节描述拉配泉断裂在 4 条横剖面上的特征。

2.1 安南坝地区

安南坝地区的拉配泉断裂出露在安南坝南，倾向南，倾角 $30 \sim 40^\circ$ 。断裂带在安南坝南部的一条河边露头较好，由 30~50 m 厚的碎裂岩带组成，以细粒化的断层泥和厘米至米尺度的受高度剪切的粉砂岩、变火山岩和灰岩块体为特征。断裂上盘的火山岩局部与超基性岩碎片并行出露。断裂带内受剪切岩石碎片的层理与破裂和旋转作用产生的剪切面很不一致。一个露头上断裂带内砾石的旋转方式指示了上盘向南下滑的运动，说明了它的正滑移断层性质。从图 3 中可以看出，东西走向的拉配泉断裂东端被活动的左行走滑阿尔金断裂所切断，并可能具有 250 km 以上的平移量^[26]。

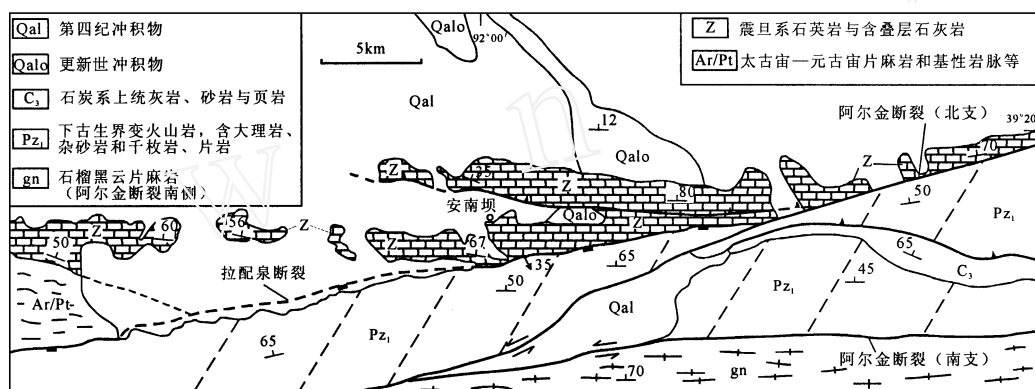


图 3 安南坝地区地质简图

Fig. 3 Geological sketch map of the Annanba area

尽管没有化石和放射性年龄数据，前人认为上盘地层的时代为新元古代^[25]。由于地层中海相化石的发现，与安南坝地区在走向上直接相连的拉配泉附近同样的岩石地层的时代被确定为晚奥陶世。因此，安南坝地区拉配泉断裂上盘岩石的时代也可能为早古生代。

安南坝地区拉配泉断裂下盘岩石为浅海相石英岩和硅质灰岩。地层向北缓倾。在石英岩层中，波纹和交错层理都很发育，而灰岩层中含有叠层石和厘米尺度的硅质岩层。强烈蚀变的基性岩床侵入到硅质灰岩中。由于叠层石的存在，下盘岩层年龄被确定为新元古代。向西，安南坝新元古代沉积地层不整合覆盖在太古宙-元古宙片麻岩之上。这一接触关系被拉配泉断裂所切割（图 3），说明拉配泉断裂切割的地壳剖面向西逐渐变深（图 2）。

安南坝紧北边存在北倾的活动逆冲断裂，使得新元古代地层层序重复出现，以及第四纪冲积扇向北倾斜（图 3）。该逆冲断层的发育与沿活动的阿尔金断裂系产生的一个大的受制弯曲并在该地区形成 2 条分支断裂有关（图 2）。阿尔金断裂的 2 条分支在该地均为东西走向，与其区域 $N65^\circ E$ 走向相去甚远（图 2）。断裂下盘灰岩层中见到几条小的逆冲断层，断距小于 50 cm。这些小断层的发育可能与该活动逆冲断裂的运动有关。

2.2 拉配泉地区

该地区拉配泉断裂为南倾, 将早古生代火山-沉积岩系、石炭系灰岩和页岩以及下-中侏罗统砾岩叠置在太古宙和元古宙片麻岩之上(图4)^[27]。断裂下盘岩石由片理化闪长质片麻岩组成, 其先是侵入富含钾长石的花岗岩, 后又有基性岩墙群的侵入。断裂下盘的这些岩墙具有不同的倾角, 但均为一致的 WNW 倾向。拉配泉断裂在东边切过岩墙群。下盘片麻岩中面理被褶皱, 在露头尺度上表现为等斜褶皱(波长和振幅均为几米左右), 在地质图上表现为向东倾伏的宽广背形和向形构造(图4)。

拉配泉断裂的倾角一般约为 30° 南倾, 局部可以低至约 15°。断层露头表现为约 2 m 厚的黄色断层泥带。在 2 处断层面上观察到擦痕, 一处为倾向南, 倾角 15°, 另一处为倾向 S30°W, 倾角 35°。断裂下盘的结晶岩系变形较弱, 没有糜棱岩的形成。断裂的直接上盘为上奥陶统火山岩, 夹灰岩、页岩和硬砂岩(图4), 地层中发育许多小尺度的不对称褶皱(波长 10~20 cm, 振幅 5~10 cm), 向南归并。另外, 平行拉配泉断裂及断裂直接上方的中尺度断层具有数厘米到数十厘米的断距, 并具有一致的上盘向南的正滑移运动。上盘发育的这些正断层与拉配泉断裂的运动直接有关, 说明了拉配泉断裂的正断层性质。

拉配泉断裂南边的构造以 2 条对冲的古近-新近纪逆冲断裂为特征: 北边为北倾的金雁山逆断层, 南边为南倾的索尔库里逆断层(图2)。2 条逆断层构成了一个始新世-早渐新世盆地。它们的上盘由含石榴子石片岩、奥陶系火山-沉积岩系、石炭系灰岩和侏罗系砾岩组成。正如下面将要讨论的, 拉配泉断裂很像是一条中生代正断层。因此, 古近-新近纪逆冲断层在深部切割拉配泉断裂, 其东部又被更年轻的左行走滑阿尔金断裂切过(图4)^[9]。

拉配泉断裂上盘下-中侏罗统沉积岩由砾岩、粗砂岩、粉砂岩和含煤页岩组成。侏罗系与奥陶纪火山岩之间为角度不整合接触。侏罗系底部砾岩约有 5~10 m 厚, 砾石成分主要为奥陶纪火山岩, 并有少量的紫色石英岩和含叠层石灰岩。接触底面之上约 30~40 m 处, 砾石成分几乎全部变为硅质灰岩、紫色石英岩和含叠层石灰岩, 它们均为安南坝浅海相地层中的特征岩石。该段侏罗系剖面砾石排列的初步观测给出古水流方向为由北向南, 与砾石源来自北部的解释相一致。以上观测支持了拉配泉地区的侏罗系地层是在拉配泉断裂的下盘剥露和快速剥蚀过程中沉积的, 说明侏罗系沉积作用与拉配泉断裂的活动具有同时性, 反过来又说明拉配泉断裂在早侏罗世(以及中侏罗世)是活动的。

由于拉配泉断裂上盘和下盘岩石类型完全不同, 无法根据对比任何岩石来计算总的滑移量。不过, 可以估算断层总滑移量的最大值。断裂带以低温碎裂变形为特征, 因此, 估计该断层总的垂向断距不会超过 15 km, 这是脆-韧性过渡带产出的最大深度。由此, 以平均倾角 30° 计算得到拉配泉断裂最大正滑移量为 30 km。事实上现在的倾角并不是断裂活动时的倾角, 因此估算值并不确定。古近-新近纪逆冲推覆和之后的阿尔金断裂左行走滑可能对拉配泉断裂的产状会有很大的改变。

2.3 喀腊大湾地区

拉配泉断裂在喀腊大湾地区表现为一条韧性剪切带, 倾向南, 上盘为早古生代花岗岩, 下盘为由变质基性岩、片麻状花岗岩和长英质片麻岩构成的太古宙-元古宙片麻岩杂岩^[27]。前寒武纪片麻岩中局部侵入有少量未变形的古生代花岗岩脉(一般为几米宽, 数十米长)。上盘的古生代花岗岩侵入到由玄武岩、流纹岩、大理岩和硬砂岩构成的地层中, 后者时代为早古生代。硬砂岩地层已经褶皱, 褶皱轴为东西走向, 局部层理被轴向劈理所置换。金雁山逆断层出现在拉配泉断裂的南边, 它在喀腊大湾地区形成 2 条分支断裂, 其北支在西边与巴

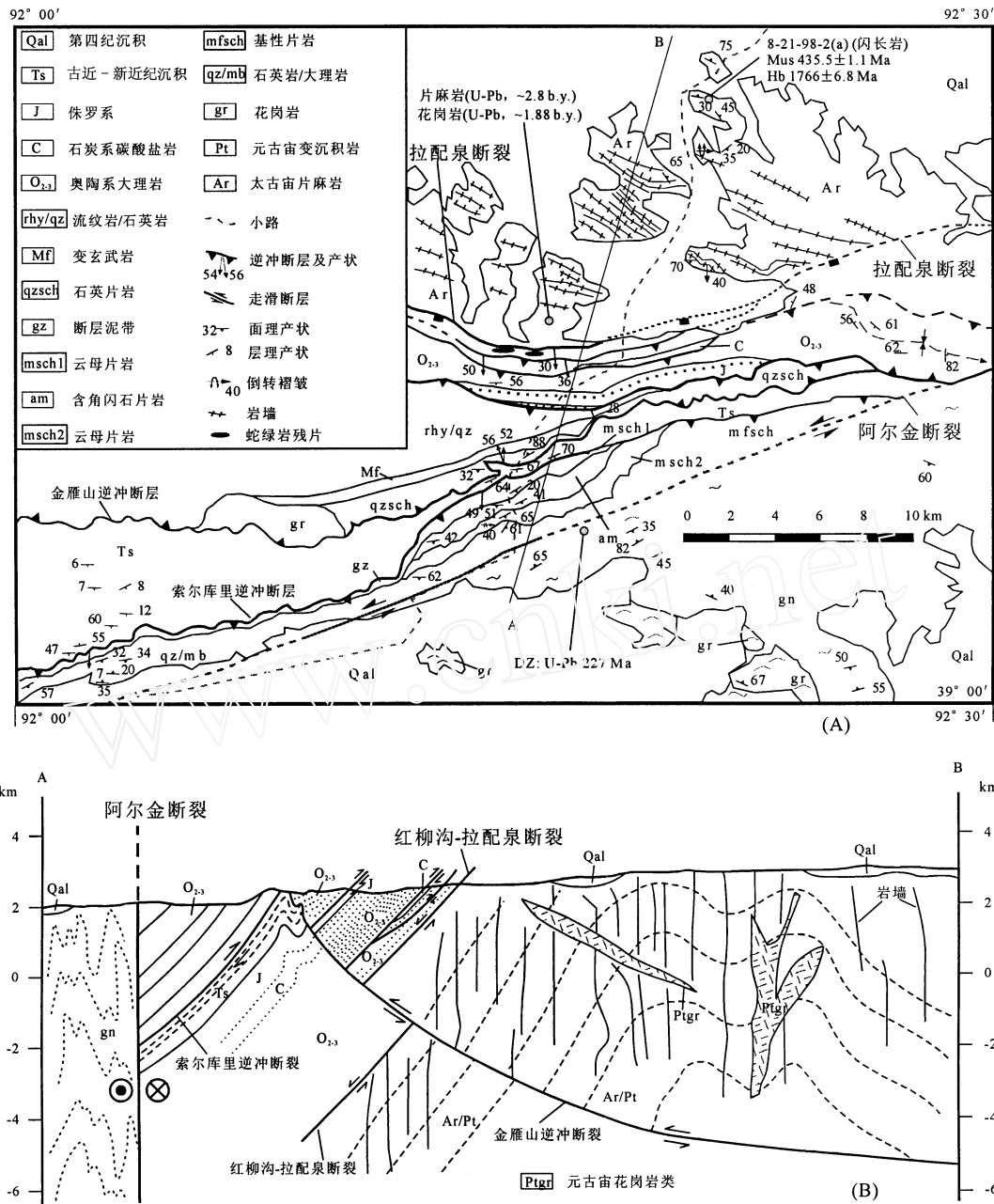


图 4 拉配泉地区地质图 (A) 和拉配泉地区地质剖面 (B)

Fig. 4 Geological map of the Lapeiquan area (a) and geological section (A-B) across the Lapeiquan area (b)

什考供逆断层相连。金雁山逆断层把更年轻的古生代硬砂岩地层叠置在较老的元古宙含叠层石大理岩之上，这种少见的推覆关系（年轻的在上）说明古近—新近纪巴什考供逆断层可能起源于一条反常的逆断层，或者是先存正断层的倒转。

紧接着拉配泉断裂的下盘含糜棱岩韧性剪切带厚度在 50 ~ 80 m 左右，由糜棱岩化的大

理岩、二云母片岩和强烈拉伸的花岗岩类布丁组成。剪切带内面理倾向南，倾角在 $60 \sim 45^\circ$ 之间。拉伸线理均为下倾（图 5B），与不对称香肠构造的指向一致，指示上盘向南的正滑移剪切运动方式。

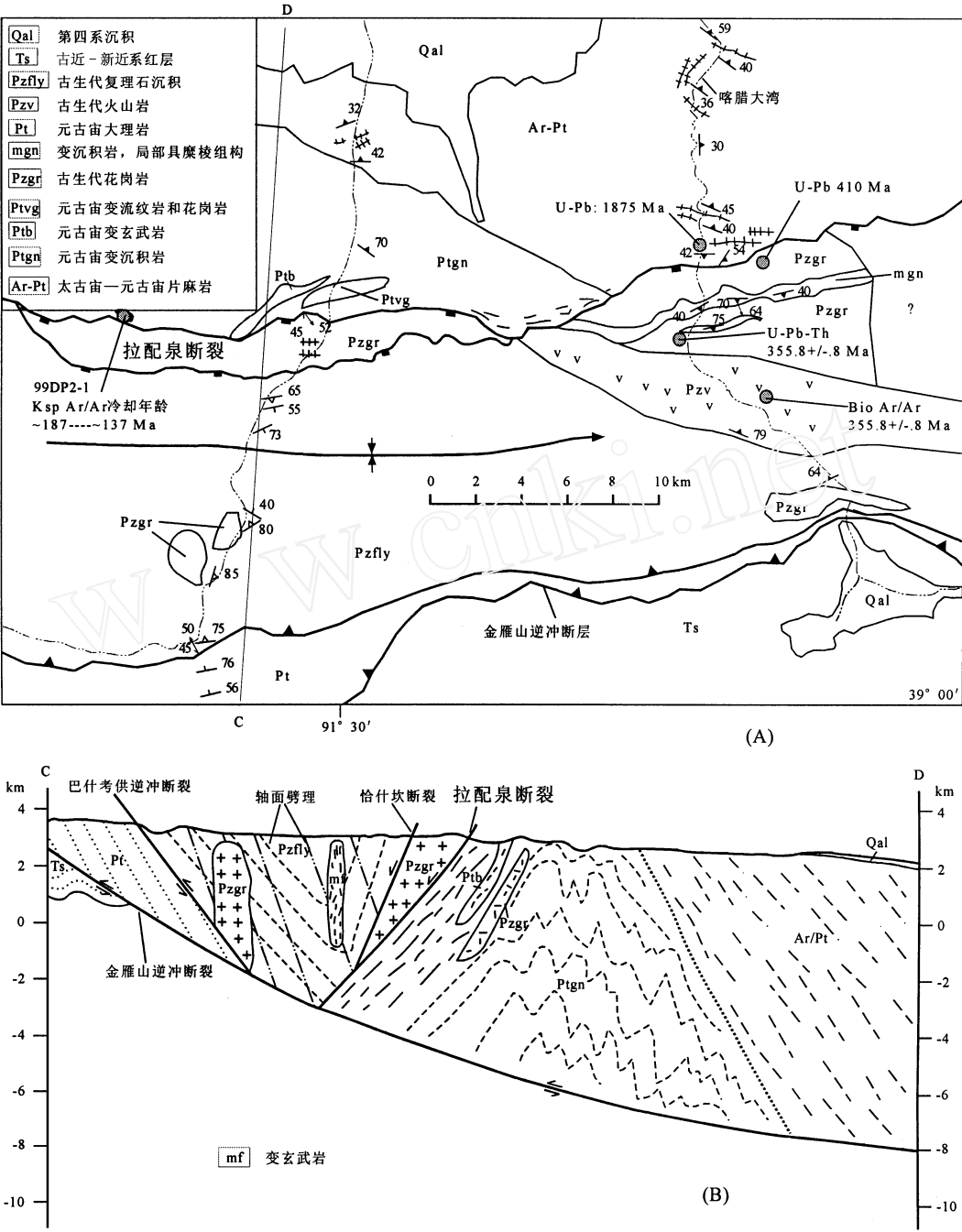


图 5 喀腊大湾地区地质图 (A) 和喀腊大湾地区地质剖面 (B)

Fig. 5 Geological map of the Kaladawan area (a) and geological cross section (C-D) of the Kaladawan area (b)

拉配泉断裂上盘岩石中发育了一条南倾的断层，这里称之为恰什坎正断层，将早古生代硬砂岩地层叠置在早古生代花岗岩类之上（图2、图5）。由于该断层被一些冲积物所覆盖，其详细的几何关系和运动学特征不甚清楚。根据已有的地质图、填图区岩石地层单位及卫片分析，认为恰什坎正断层向东与拉配泉断裂合并（图5）。该断层向西可追踪到恰什坎萨依地区（图6）。

与拉配泉地区的情形相似，喀腊大湾地区的拉配泉断裂上、下盘的岩石类型也完全不同。由于这里的断层带以石英岩和花岗岩的糜棱岩化变形为特征，推测该剖面垂向总断距大于15 km，即超过了脆-韧性转换带的深度。以45°作为该处拉配泉断裂的平均倾角，估算其最小正滑移量为21 km。前已述及，这一估算值没有考虑断层形成后受更新变形作用的改造。

2.4 恰什坎萨依地区

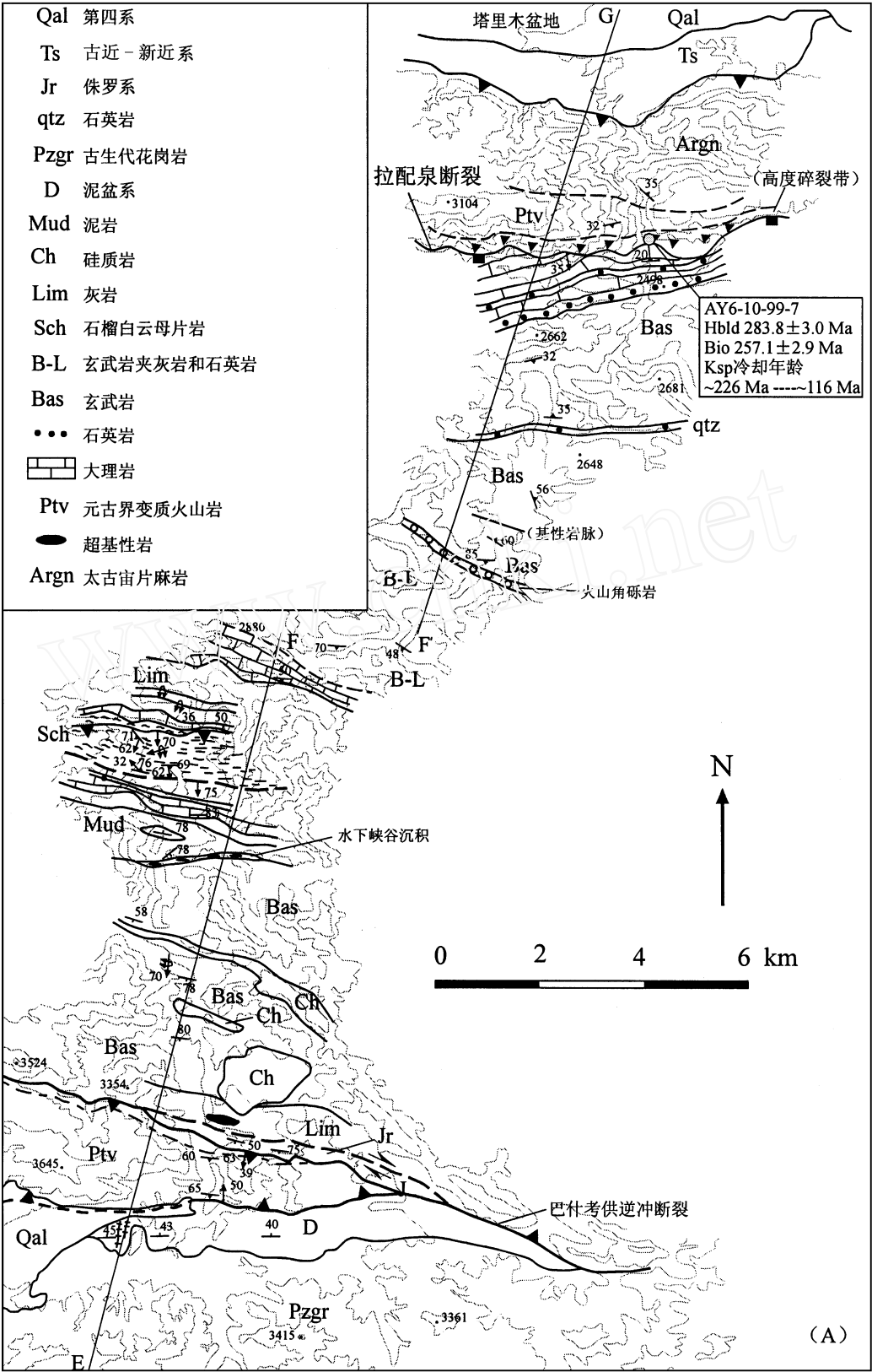
沿巴什考供附近的恰什坎萨依沟，对拉配泉断裂东段露头进行了分析（图2、图6）。该处拉配泉断裂是根据一条厚度大于50 m、倾向南、倾角为约30~40°的碎裂剪切带而确定的。其上盘由褶皱了的火山、沉积和变质岩地层组成，可分为3个地质单元。北部单元为拉配泉正断层与南边的北恰什坎逆断层（南倾）之间，主要由玄武岩夹大理岩和硅质岩层组成，局部出现由本地来源的玄武岩砾石组成的砾岩层，发育开阔褶皱。局部地区轴向劈理发育并置换了层理。褶皱地层中侵入有近东西走向的基性岩脉（图7）。北恰什坎逆断层将含石榴子石片麻岩推覆到向北倾伏的由细粒砂岩和页岩组成的同斜褶皱之上，其年龄和断距还不清楚。

中部单元为高级片麻岩^[18,20]和超基性岩体-条带状硅质岩-枕状熔岩组成的混杂堆积，被认为是红柳沟缝合线的一部分^[15,18,21]。高级片麻岩与混杂堆积之间是一条高角度南倾的韧性剪切带，这里称之为恰什坎正断层。该断层可以追踪到喀腊大湾地区，并与拉配泉断裂合并（图2、图5和图6）。

恰什坎正断层紧下盘的片麻岩已经糜棱岩化，发育由条痕状石英组成的很好的矿物拉伸线理。糜棱岩面理和线理产状变化很大。靠近韧性断层的线理或为垂直或为近于平行断层面（图5）。该地区运动学标志如S-C组构和不对称眼球构造指示了上盘向南下滑的剪切运动，并具有左行走滑成分。北部单元和中部单元的岩石成分在切穿恰什坎正断层的剖面上比较相似，主要都是玄武岩地层（图6中的Pzb单位）。这种地层重复现象可能是恰什坎正断层上滑移运动的结果，根据这一对应关系，得到约5~7 km的水平伸展量。沿南倾的北恰什坎逆断层的滑移也有可能产生地层重复。

拉配泉断裂上盘的南部单元为南倾的北巴什考供逆断层与北倾的巴什考供逆断层之间的挤出构造层。这2条逆断层均为古近-新近纪构造。该单元由变火山岩（主要为流纹岩和安山岩，其中侵入有一个小的花岗岩类深成岩体）地层组成（图6），它们的时代属于早古生代。巴什考供逆断层的下盘由泥盆系砂岩和页岩（侵入有花岗岩类）组成。北巴什考供逆断层的下盘有一个侏罗纪断层裂块，在其两端切过一条右行走滑断裂（图6）。

恰什坎萨依地区的拉配泉断裂以10~20 m厚的碎裂变形带为特征。断裂带内发育有较好的断层泥，断层擦痕不发育。断裂带的紧下方为一板条状早古生代花岗岩，厚100~120 m，普遍经受了破裂和剪切变形。该花岗岩可能是断裂带的一个碎片（图6）。花岗岩之下为片岩系，时代属于前寒武纪。片岩中发育较好的面理，向南缓倾，倾角30~40°，与约150 m之上的拉配泉断裂倾向平行；同时发育许多小尺度不对称褶皱（振幅3~5 cm，波长5



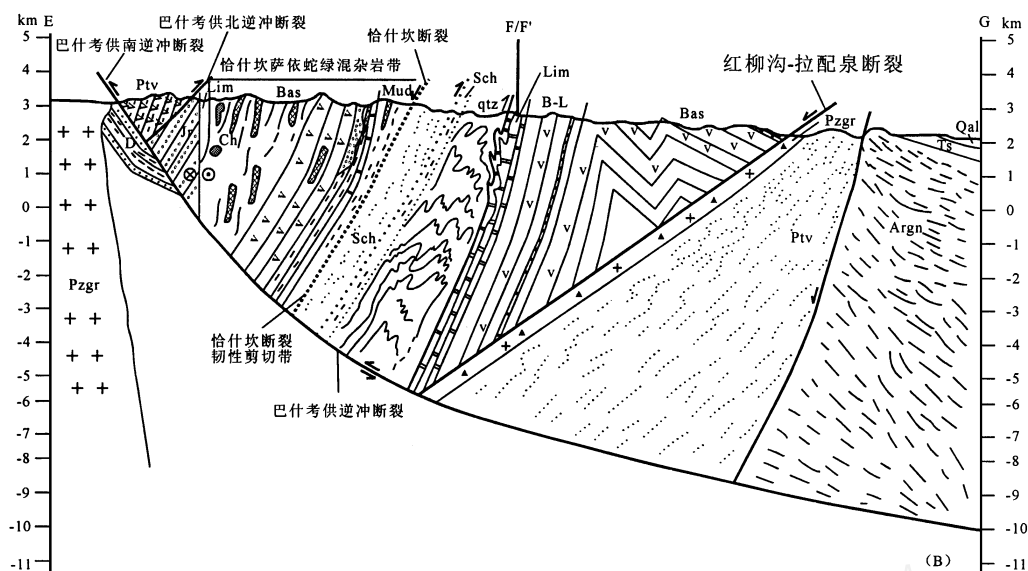


图 6 恰什坎萨依地区地质图 (A) 和地质剖面 (B)

Fig. 6 Geological map of the Qiaoshikansayi area (a) and geological cross section of the Qiaoshikansayi (b)

~ 10 cm), 具有与拉配泉断裂平行的东西走向枢纽, 并指示一致的上盘向南剪切方式。片岩之上叠置有闪长片麻岩, 由一南倾的高角度脆性断层 (南倾的拉配泉正断层体系的组成成分) 带来。填图区的最北端出露有古近纪沉积地层, 不整合覆盖在前寒武纪片麻岩上, 产状为向北缓倾。古近系产状说明拉配泉断裂及其下盘自古近纪以来曾经向北倾斜。上述片岩系中的运动学标志, 以及覆盖在高级片岩和片麻岩之上未变质沉积 - 火山岩系的观测结果, 都支持拉配泉断裂为一条正断层的结论。

3 地质年代学

为了更好地控制拉配泉断裂正断层活动的时间, 我们确定了断裂下盘几个关键样品的结晶年龄和低温热历史。这里用锆石离子探针 U-Pb 定年和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年来控制结晶年龄, 而用钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加温方法得到热历史数据。

3.1 U-Pb 地质年代学

拉配泉断裂下盘 3 个花岗岩样品, 分别为 AY6-10-99- (7)、AY6-3-99-14 和 AY6-1-99- (4), 给出了锆石年龄。第 4 个样品 99DP2-1 没有得到用于测年的足够锆石。测量结果的分析误差均表示为 ± 1 。根据 AS-3 标准锆石 (1099 Ma)^[28] 的重复测量, 在上述样品的分析过程中, 如果样品是均匀的, 且铀浓度与 AS-3 (约 550×10^{-6}) 处在相当数量级上, 预期 U-Pb 年龄的精度将会好于 2.5 %。

样品 AY6-10-99- (7) 采自恰什坎萨依地区拉配泉断裂的紧下盘强烈破碎的花岗岩中 (图 6A)。5 个颗粒上 5 点的测量结果得到基本一致的年龄值, 处在大约 400 ~ 430 Ma 之间 (图 7A)。计算的权重平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄分别为 418 ± 8 Ma 和 402 ± 16 Ma, 它们很接近该花岗岩的侵入年龄, 并与其西南的阿尔金断裂带沿线古生代深成岩体的年龄^[22] 相当。

喀腊大湾样品 AY6-3-99-14 (图 5A) 给出较复杂的结果。该样品处在拉配泉下盘约 200 m 处, 为侵入到元古宙变沉积岩和变火山岩系中的未变形花岗岩脉。5 个颗粒的 5 点分析得到年龄范围为 100 ~ 415 Ma 的不一致年龄 (图 7B)。该样品 U-Pb 年龄上的分散性可能是 Pb 丢失的结果, 其中最老的年龄接近一致年龄 (413 ± 7 Ma)。该结果与样品 AY6-10-99-(7) 结晶年龄相似, 说明了花岗岩脉也是青藏高原北缘普遍的早古生代侵入岩系列的一部分的可能性^[22]。拉配泉断裂下盘古生代花岗岩是一个新发现, 它们早先被认为是新太古代的。本文结果说明, 并不能把塔里木基底缺少古生代侵入体作为早古生代南倾俯冲带存在的证据。

第 3 个样品 AY6-1-99-(4), 采自拉配泉断裂下盘靠近断层面的前寒武纪基底花岗片麻岩中 (图 4A)。该样品中锆石的探针分析结果也很分散且不一致, 显示 Pb 丢失的不连续阶段性 (图 7C)。U-Pb 数据点最佳拟合线与谐和线的上交点给出年龄 1815 ± 12 Ma, 下交点年龄为 133 ± 15 Ma (比与其共生的钾长石记录的快速冷却时间稍早)。处在拉配泉断裂以北大约 12 km 处岩性相似的样品 AY8-21-98-2A 中角闪石 (图 4) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 总气体年龄为 1767 ± 3 Ma, 仅比样品 AY6-1-99-(4) 中锆石 U-Pb 上交点年龄稍微大一点。

3.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热历史分析结果

为确定拉配泉断裂附近和远处岩石的冷却历史, 采用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加温方法分析了断裂下盘总共 5 个钾长石样品 (图 8), 并在缓慢冷却假定下利用多重扩散域 (MDD) 模型来模拟其热历史^[29,30]。样品 AY9-21-98-2A (图 8I) 情况下, 需要对年龄谱的开始部分做与 Cl 有关的过剩放射成因 ^{40}Ar 校正^[31]。其它样品不需要做此处理, 不过其年龄谱的某些特征是有问题的, 需要详细讨论。

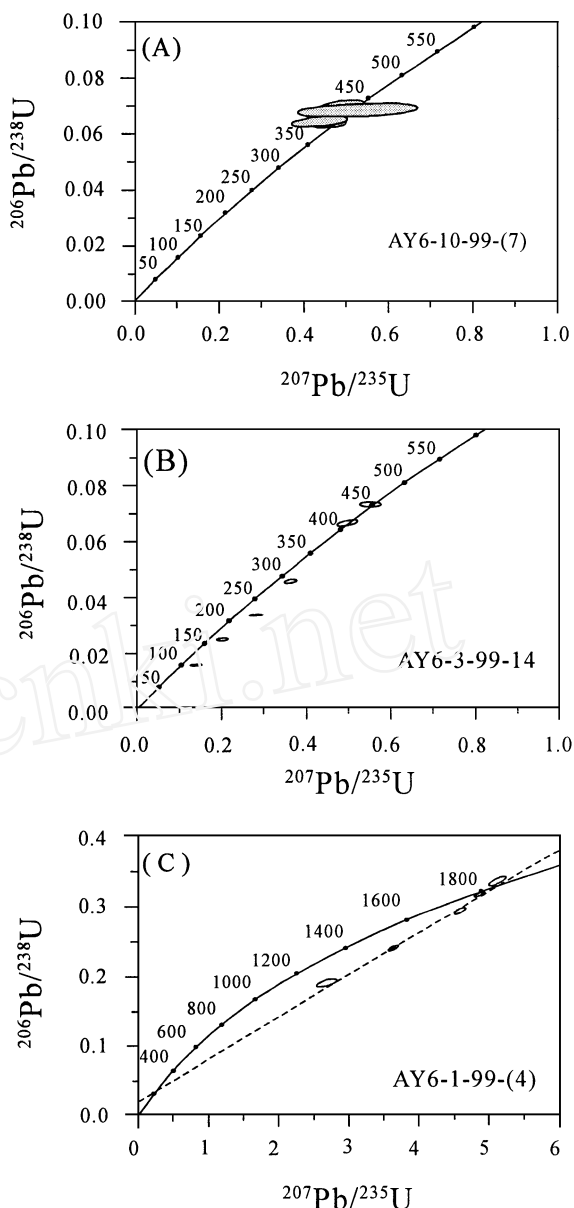


图 7 锆石 U-Pb 定年结果

Fig. 7 Results of zircon U-Pb dating

(A) 恰什坎萨依地区拉配泉断裂紧下盘高度剪切变形的花岗岩样品 AY6-10-99-(7), 5 个颗粒的 5 点分析给出基本一致的年龄范围, 处在大约 400 ~ 430 Ma 之间, 其权重平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄分别为 418 ± 8 Ma 和 402 ± 16 Ma。(B) 喀腊大湾地区样品 AY6-3-99-14 给出较为复杂的结果。样品为一个未变形的花岗岩脉, 侵入到元古宙变沉积岩中。5 个颗粒的 5 点分析给出不一致年龄范围为 100 ~ 415 Ma。我们认为, U-Pb 年龄的分散性可能是 Pb 丢失的结果, 其中最老的年龄与一致线年龄 413 ± 7 Ma 相当。(C) 样品 AY6-1-99-(4) 中锆石点分析结果十分分散和不一致, 与不连续阶段性 Pb 丢失模式相吻合。数据最佳拟合线与一致线的上交点年龄为 1815 ± 12 Ma, 而下交点年龄为 133 ± 15 Ma, 比该样品中共生钾长石记录的快速冷却年龄稍微老一点。

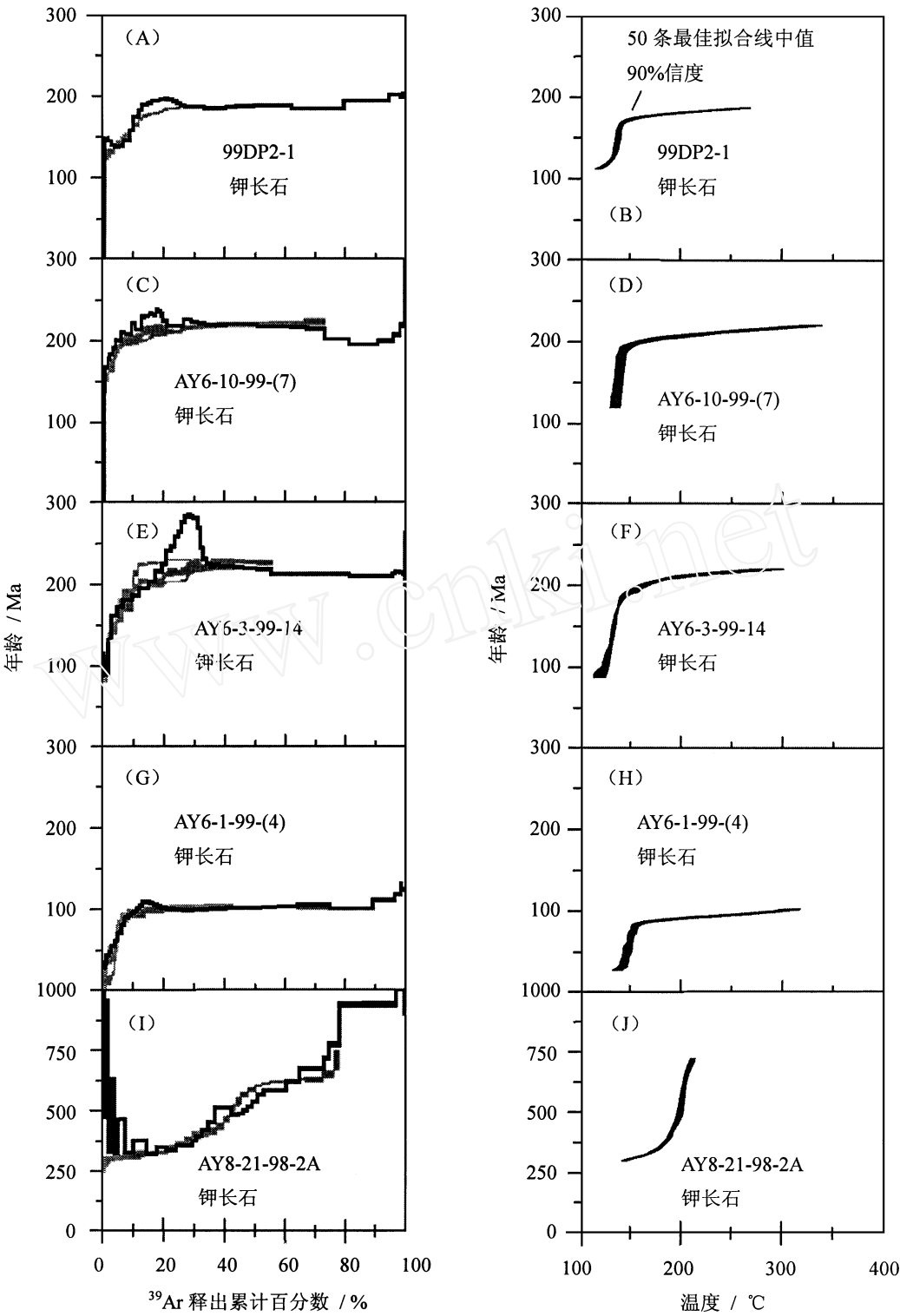


图 8 钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热 MDD 分析结果

Fig. 8 Results of multi-diffusion-domain (MDD) analysis of K-feldspars using the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating method. 其中:A、C、E、G和I分别为样品99DP2-1、AY6-10-99-(7)、AY6-3-99-14、AY6-1-99-(4)和AY8-21-99-2A的实测(实线)和模拟(浅灰色线)年龄谱线;B、D、F、H和J为对应样品的冷却历史计算结果。

许多采自接近断裂的高应变带内的钾长石, 虽然并不是全部, 存在中间年龄峰, 这不符合 MDD 模拟的全部假设, 因而限制了对这些年龄谱得到的热历史的精细解释^[32]。接近拉配泉断裂的所有 5 个样品都存在这一特征 (见图 8A, 8C, 8E, 8G 和 8I)。特别明显的是样品 AY6-3-99-14 的钾长石 (图 8E)。尽管如此, 年龄谱中未受影响部分十分简单, 可以对这部分年龄谱进行模拟。

拉配泉断裂西段 3 个古生代花岗岩中钾长石样品得到十分相似的结果。这 3 个样品为喀腊大湾地区的 99DP2-1、AY6-3-99-14 (图 5A) 和恰什坎萨依地区的 AY6-10-99- (7) (图 6A)。它们在³⁹Ar 累计释放年龄谱的 100 ~ 200 Ma 之间都出现明显的年龄梯度, 其中样品 99DP2-1 在大约 186 Ma 以上的高温阶段出现较平的年龄谱 (图 8A), 而样品 AY6-10-99- (7) (图 8C) 和 AY6-3-99-14 (图 8E) 出现在大约 220 Ma 以上。在应用 MDD 模拟方法时, 忽略了中间年龄峰, 它一般影响年龄谱中大约³⁹Ar 累计释放在 15 % ~ 25 % 之间的部分, 使该部分偏离单调冷却过程。得到的热历史代表了 50 个最佳拟合的平均值的 90 % 可信区间, 分别见图 8B、8D、8F、8H 和 8J。相应的最佳拟合年龄谱见图 8A、8C、8E、8G 和 8I。尽管对热历史结果的精细解释好像有困难, 根据结果的相似性可认为, 所有这些样品在 220 ~ 185 Ma 之间经历了快速冷却过程至 200 °C 以下, 其余的 80 Ma 经历了上地壳层次的缓慢冷却过程。

在更东边的拉配泉地区分析了 2 个钾长石样品 (图 4), 均采自前寒武纪片麻岩。其中靠近拉配泉断裂的样品 AY6-1-99- (4), ³⁹Ar 释放年龄谱最初 15 % 部分在大约 30 Ma 到 100 Ma 之间产生年龄梯度, 100 Ma 以上的其余部分出现平的年龄谱 (图 8G)。根据类似的分析方法, 得到该样品快速冷却至约 175 °C 的时间在 100 Ma, 之后为从 100 Ma 一直到晚渐新世的缓慢冷却过程 (图 8H)。离拉配泉断裂较远的下盘样品 AY8-21-98-2A (图 8I), 显示了古生代和早中生代期间在中-上地壳层次长期的缓慢冷却过程 (图 8J)。该结果与前人对靠近 AY8-21-98-2A 样品的裂变径迹分析结果一致, 它们给出单颗粒锆石的 FT 年龄为 221 ± 26 Ma, 磷灰石 FT 年龄为 167 ± 15 Ma^[33]。样品 AY8-21-98-2A 中角闪石给出⁴⁰Ar/³⁹Ar 总气体年龄为 1767 ± 3 Ma。由于在样品 AY6-1-99- (4) 和 AY8-21-98-2A 之间没有大的断裂存在, 这 2 个样品热历史的明显差异 (在 100 Ma 之间存在 > 150 °C 的温差) 说明, 在起源深度上, 现在沿拉配泉断裂出露的前寒武纪片麻岩比北东 10 km 处的那些片麻岩至少要深 5 km。年龄数据与野外观测显示的拉配泉断裂为一南倾正断层的结论相一致。也就是说, 断裂越向南切割越深。

黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄也有很大的不确定性。喀腊大湾地区, 拉配泉断裂下盘片麻岩中黑云母给出 351 ± 11 (2) Ma 的年龄 (AY8-23-98-3b, 图 5)。而下盘古生代岩墙中黑云母得到更年轻的年龄 201 ± 20 (2) Ma (AY6-3-99-14, 图 5)。下盘黑云母冷却年龄与钾长石分析中得到的快速冷却持续时间相似。断层剖面上冷却年龄的差异, 支持拉配泉断裂作为一条正滑移构造的解释。在恰什坎萨依, 拉配泉断裂下盘古生代花岗岩中黑云母给出 254 ± 26 Ma (2) 的年龄 (图 6), 说明早古生代花岗岩的冷却过程可能开始于早三叠世, 青藏高原北部伸展作用开始的年龄比钾长石分析得到的要早。

4 讨论

4.1 拉配泉正断层定年和构造演化

⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学给出拉配泉断裂下盘 2 期快速冷却过程。第一期发生在断裂中段和西段, 时间为早侏罗世的约 187 ~ 200 Ma; 第二期发生在断裂东段, 时间为早白垩世晚期的约

100 Ma。这说明，同一断裂上存在非常不同的活动历史，并可能与恰什坎正断层的活动有关。恰什坎正断层为南倾，在喀腊大湾剖面的东边与拉配泉断裂合并（图 2），说明了拉配泉断裂的东段在白垩纪时与恰什坎断裂一起运动，而这时拉配泉断裂的西段不活动。根据拉配泉断裂与恰什坎断裂之间的几何关系，它们应该是同时的。这意味着拉配泉断裂可能最初为早侏罗世正断层，并在后来被恰什坎 - 拉配泉东断裂运动活化（图 9A）。或者，年轻的恰什坎断裂切断并拆开老的拉配泉断裂（图 9B）。北西走向岩墙群的连续性说明拉配泉断裂东段下盘没有出现明显的断层，支持了前一可能性。拉配泉断裂东段紧下盘岩石的白垩纪快速冷却事件，与图 9A 中给出的模型也是符合的。

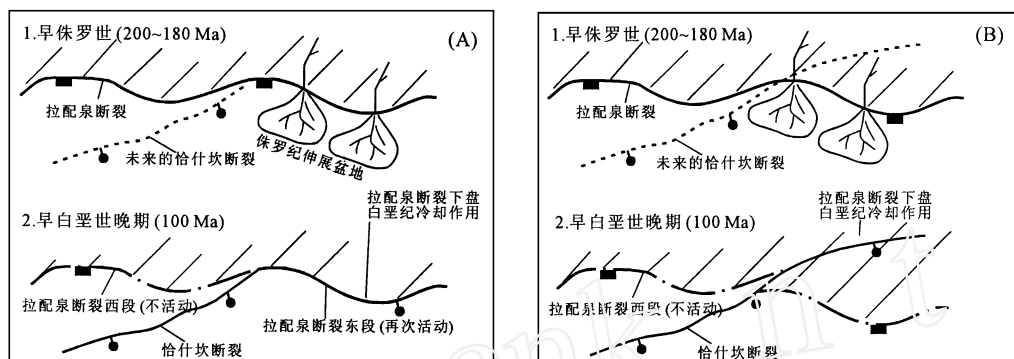


图 9 拉配泉和恰什坎 2 条正断层之间关系的 2 种可能模型

Fig. 9 Two possible models for the relationship between the Lapeiquan and Qishikan normal faults

(A) 在白垩纪激活早侏罗世活动的拉配泉断裂的东段。该模型与本文拉配泉断裂东段紧下盘白垩纪冷却过程相一致。(B) 恰什坎断裂在白垩纪切过并平移了早期的拉配泉断裂。由于在拉配泉断裂下盘的前寒武纪片麻岩中没有发现大的断裂，该模型不大可能成立。

恰什坎断裂如真是白垩纪正断层，恰什坎萨依剖面上的正断滑移量一定非常有限。恰什坎正断层紧下盘高级片麻岩中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄为 $575 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $573 \pm 6 \text{ Ma}$ ^[20]，说明这时的正断层作用幅度不足以重置白云母的冷却年龄。恰什坎正断层在恰什坎萨依地区可能仅吸收了大约 5~7 km 的水平伸展量。

野外观察结果支持拉配泉断裂启动于早侏罗世的观点。拉配泉地区的断裂上盘下-中侏罗统沉积在一个半地堑盆地中，其碎屑物质均来源于断裂下盘。本文提出的下-中侏罗统受东西走向伸展断裂控制的观点，与传统上认为青藏高原北部早-中侏罗世（208~163 Ma）盆地产生于收缩背景之下的观点有很大不同。例如，前人曾认为青藏高原北部下-中侏罗统地层是在昆仑山往北的逆冲带的前陆盆地的一个统一大湖中沉积的^[7]。而实际上，阿尔金地块整个地区普遍发育早侏罗世冷却年龄^[22,33]。虽然该冷却事件被解释为与收缩作用有关^[33]，构造观测结果则说明这些冷却年龄也可能与伸展构造有关。这意味着青藏高原北部阿尔金断裂两侧零星分布的下-中侏罗统露头可能沉积在许多受伸展断裂控制的半地堑盆地中，而将阿尔金断裂两侧侏罗纪湖岸线作为错断标志^[7]的做法过于简单。

前人认为西昆仑地区中侏罗纪统下组沉积在一个受走滑断裂系控制的转换拉张盆地中，该盆地走向北西^[34]。如果考虑新生代帕米尔地块向北楔入过程中西昆仑的顺时针旋转效应^[35~38]，由于南北向伸展作用，侏罗纪盆地的方位可能已经是近东西走向。这说明青藏高原北部早侏罗世伸展作用普遍发育。

人们对阿尔金断裂与祁连山逆冲断裂前锋交会处的酒泉盆地晚侏罗世至早白垩世伸展作用已有很好的认识。几十年石油勘探的结果说明,早白垩世伸展作用很普遍。横穿酒泉盆地的地震发射剖面上存在数条正断层,它们或者以伸展叠瓦体的多米诺型式排列,或者作为铲状断层控制包括晚侏罗世至早白垩世地层的沉积,看来是处在阿尔金东段2期伸展作用的中间阶段。这说明在三叠纪末期至早白垩世期间青藏高原北部的伸展构造是一个连续的过程,虽然每个伸展构造的活动时间可能是穿时的。青藏高原北部广泛出现的中生代伸展构造限制了压应力穿过青藏高原和塔里木盆地向天山的传播。

4.2 青藏高原北部及东亚地区侏罗纪和白垩纪构造背景

青藏高原北部2期南北向中生代伸展作用产生的机制是什么?三叠纪末期羌塘、松潘-甘孜、昆仑和华北地块之间的碰撞过程中,在青藏高原北部形成了一个宽的造山带^[9,39]。在早侏罗世羌塘地块南缘是亚洲大陆的南缘。当羌塘地块与昆仑地块之间的碰撞刚刚结束,就出现了北倾的俯冲带^[9],其岩浆弧以早侏罗世花岗岩侵入带为特征^[8]。羌塘地块中、上侏罗统中普遍出现的安山质熔岩流说明岩浆弧的活动一直持续到晚侏罗世。因此,侏罗纪青藏高原北部的阿尔金山地区处在弧后背景。羌塘地块发育的伸展构造也出现在侏罗纪早期约200 Ma^[8]。不过,羌塘地块的伸展构造体系都出现在侏罗纪弧之内,其伸展方向为东西走向,与阿尔金山东段的伸展方向近于垂直。推测特提斯洋向北俯冲作用的开始,导致了青藏高原北部地壳的热弱化,引起了晚三叠世造山带的重力崩塌。

早侏罗世伸展作用仅局限在青藏高原中部和北部,与之相反,早白垩世140~100 Ma期间的伸展作用发育在整个东亚地区^[1,40]。高原中部拉萨地块与羌塘地块之间的碰撞作用结束于白垩纪初期^[5,9]。但是,这2个地块之间的连续汇聚作用产生了著名的措勤逆冲带,其活动时间为早白垩世晚期^[2]。青藏高原白垩纪伸展构造局限在阿尔金山东段和酒泉的祁连山前陆地区。

青藏高原北部的晚白垩世伸展事件与蒙古南部和华北地区的伸展事件具有相同的时间和变形形式。中蒙边境线上南北向拆离断层系——亚干-Onch Hayrhan 核杂岩,其活动时间为早白垩世的129~126 Ma之间^[41,42]。早白垩世伸展事件也出现在北京的云蒙山^[43]、渤海东边的辽南地区^[1]、华北大青山^[44]和大别山^[40]。东亚的白垩纪伸展作用只局限在华北和青藏高原,而该地区早中生代地壳缩短是非常显著的^[1]。

青藏高原北部和东亚的中生代伸展构造可以用以下模型来解释。早侏罗世伸展作用主要集中在青藏的中部和北部,并主要受特提斯洋的俯冲作用控制。青藏北部的阿尔金山伸展构造主要是近南北向,而青藏中部的羌塘的伸展构造主要为东西向^[8]。青藏中部和北部早期伸展事件的分布受空间控制的事实说明,伸展事件主要受亚洲南缘边界条件的制约。晚白垩世普遍发育的伸展构造可能与一个又长又连续的岩浆弧的向东和向南的扩展有关。拉萨地块在侏罗纪末期至晚白垩世自北缘向南缘的岩浆弧向南扩展事件已有较多的研究^[9]。中国东部中生代深成岩和火山岩的时空分布特征也说明有一个向东的弧扩展事件。特提斯-太平洋俯冲板片在倾向方向上的后撤,可能引起亚洲下部的软流圈流动。热弱化效应及伴随的华北地区晚侏罗世燕山造山带的崩塌可能最后导致并保持东亚的伸展构造^[1,40,45]。

4.3 中生代和新生代构造之间的关系

拉配泉断裂被阿尔金断裂切过,因此,其发育历史不可能影响后者大型陆内走滑断裂的启动和演化历史。不过,中生代伸展构造可能控制了更小尺度构造的发育。例如,巴什考供逆断层的某些部位把年轻的古生代地层推覆到元古宙之上(图6)。这个关系可能是不寻常

的逆冲推覆作用的结果，但是也可以解释为一条老的中生代北倾正断层的倒转并被活化而变为逆断层。由于新生代变形效应还没有被剔除掉，该地区中生代伸展构造的反演和重建还不太成熟。

5 结论

长度大于 300 km 的南倾拉配泉正断层活动分为 2 个时期：晚三叠世至早侏罗世和早白垩世末期。断裂的倾角变化范围为 30~50° 南倾，其中段的正滑移量大于 25 km。拉配泉断裂早侏罗世正滑移运动产生了沉积早-中侏罗世粗粒地层的半地堑，其沉积物来源于拉配泉下盘岩石。早白垩世伸展阶段仅出现在拉配泉断裂的东段，与南边的南倾恰什坎正断层有运动学联系。区域综合研究的结果说明，从蒙古南部到华北的东亚地区普遍发育中生代伸展构造。青藏高原和东亚地区的早侏罗世和早白垩世伸展事件，可以归结为特提斯洋板块在南部和太平洋在东部的俯冲作用导致的弧后扩张的结果。

致谢 沈洁、Alex Robinson 和 Matt Spurlin 完成了部分⁴⁰Ar/³⁹Ar分析，谨表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Yin A, Nie S. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin A, Harrison TM (eds), *The Tectonic Evolution of Asia*. London: Cambridge University Press, 1996. 442~485.
- [2] Murphy MA, Yin A, Harrison TM, Durr SB, Chen Z, Ryerson FJ, Kidd KS F, Wang XF, Zhou X. Significant crustal shortening in southern Tibet prior to the Indo-Asian collision. *Geology*, 1997, 25: 719~722.
- [3] 常承法, 郑锡澜. 中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征以及青藏高原东西向诸山系形成的探讨 [J]. *中国科学*, 1973, (2): 190~201.
- [4] Allègre CJ, 34 others. Structure and evolution of the Himalayan-Tibet orogenic belt. *Nature*, 1984, 307: 17~22.
- [5] Dewey J F, Shackelton RM, Chang C, Sun Y. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, A327: 379~413.
- [6] Hendrix MS, Graham SA, Carroll AR, Sobel SR, McKnight CL, Schulein BJ, Wang Z. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, northwest China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1992, 104: 53~79.
- [7] Ritts BD, Biffi U. Magnitude of post-Middle Jurassic Bajocian displacement on the central Altyn Tagh fault system, northwest China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2000, 112: 61~74.
- [8] Kapp PA, Yin A, Manning C, Murphy MA, Harrison TM, Din L, Deng XG, Wu CM. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. *Geology*, 2000, 28: 19~22.
- [9] Yin A, Harrison TM. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *J. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, 28: 211~280.
- [10] Kong A, Yin A, Harrison TM. Evaluating the role of pre-existing weakness and topography in the Indo-Asian collision using a thin-shell finite element model. *Geology*, 1997, 25: 527~530.
- [11] Chen Xuanhua, Yin A, Gehrels GE, Cowgill ES, Grove M, Harrison TM, Wang XF. Two phases of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range, northern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2003, 22 (5), 1053, doi: 10.1029/2001TC001336.
- [12] 陈宣华, 尹安, Gehrels G, 等. 青藏高原北缘中生代伸展构造⁴⁰Ar/³⁹Ar测年和MDD模拟 [J]. *地球学报*, 2002, 23 (4): 305~310.
- [13] Burchfiel BC, Deng Q, Molnar P, Royden LH, Wang Y, Zhang P, Zhang W. Intracrustal detachment with zones of conti-

mental deformation. *Geology*, 1989, 17: 748 ~ 752.

- [14] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. 841.
- [15] 车自成, 刘良, 孙勇. 阿尔金铅、钨、铋、氧同位素研究及其早期演化 [J]. *地球学报*, 1995, 16 (3): 334 ~ 337.
- [16] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, Yang J S, Cui J W. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 2001, 56: 187 ~ 206.
- [17] Cowgill E, Yin A, Wang X F, Zhang Q. Late Cenozoic left-reverse slip movement along the Northern Altyn Tagh Fault and its possible development as the northern boundary of a transpressional strike-slip duplex. *Geology*, 2000, 28: 255 ~ 258.
- [18] 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 阿尔金地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境 [J]. *科学通报*, 1995, 40 (14): 1298 ~ 1300.
- [19] Liu L, Che Z C, Luo J H, Wang Y, Gao Z I. Recognition and implication of eclogites in the western Altun Mountains, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42: 931 ~ 934.
- [20] 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 1999, 15 (1): 57 ~ 64.
- [21] Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 1999, 18: 64 ~ 74.
- [22] Cowgill E S. Tectonic evolution of the Altyn Tagh-Western Kunlun fault system, western China. Ph. D thesis, University of California, Los Angeles, 2001. 1311.
- [23] Guo Z J, Zhang Z C, Jia C Z, Wei G Q. Tectonics of Precambrian basement of the Tarim craton. *Science in China (Series D)*, 2001, 44: 229 ~ 236.
- [24] 国家地震局“阿尔金活动断裂带”课题组. 阿尔金活动断裂带 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [25] 中国地质科学院成都地质矿产研究所. 青藏高原及邻区地质图 (1:1500000) (附说明书) [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [26] Yin A, Gehrels G, Chen X, Wang X, and Harrison T M. Normal-Slip Motion on the Northern Altyn Tagh Fault. *Eos*, 2000, 81: 1092, AGU Transactions.
- [27] 车自成, 孙勇. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底 [J]. *中国区域地质*, 1996, (1): 51 ~ 57.
- [28] Paces J B, Miller J D. Precise U-Pb age of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: Geochronological insights into physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 13, 997 ~ 14, 013.
- [29] Lovera O M, Richter F, Harrison T M. Diffusion domains determined by ^{39}Ar released during step heating. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96: 2057 ~ 2069.
- [30] Lovera O M, Grove M, Harrison T M, Mahon K I. Systematic analysis of Kfeldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating experiments I: Significance of activation energy determinations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 3171 ~ 3192.
- [31] Harrison T M, Heizler M T, Lovera O M, Chen W, Grove M A. Chlorine disinfectant for excess argon released from Kfeldspar during step heating. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 23: 95 ~ 104.
- [32] Lovera O M, Grove M, Harrison T M. Systematic analysis of Kfeldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating experiments II: Relevance of laboratory Kfeldspar argon diffusion properties to Nature. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, 66: 1237 ~ 1255.
- [33] Sobel E R, Arnaud N, Jolivet M, Ritts B D, Brunel M. Jurassic to Cenozoic exhumation history of the Altyn Tagh range, NW China constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track thermochronology. *Geol. Soc. Am. Memoir*, 2001, 194: 247 ~ 267.
- [34] Sobel E R. Basin analysis of the Jurassic-Lower Cretaceous southwest Tarim basin, NW China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1999, 111: 709 ~ 724.
- [35] Burtman V S, Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. *Geol. Soc. Am. Special Paper*, 1993, 281: 1 ~ 76.
- [36] Rumelhart P, Yin A, Butler R, Cowgill E, Zhang Q, Wang X. Cenozoic vertical-axis rotation of southern Tiarim: Constraints on the tectonic evolution of the Altyn Tagh fault system. *Geology*, 1999, 27: 819 ~ 822.
- [37] Yin A, Yang Z Y, Butler R, Otofuiji Y-I, Rumelhart P E, Cowgill E. Correction of “Cenozoic Vertical-axis Rotation of the Altyn Tagh Fault System” by Rumelhart et al. *Geology*, 2000, 28: 480.
- [38] Shen Z K, Wang M, Li Y, Jackson D D, Yin A, Dong D, Fang P. Crustal deformation along the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 30607 ~ 30621.

- [39] Hs ÜK and 15 others. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: A working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis. *Int. Geol. Rev.*, 1995, 37: 473 ~ 508.
- [40] Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 13, 303 ~ 13, 338.
- [41] 郑亚东, 张青. 内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层 [J]. *地质学报*, 1993, 67 (4): 301 ~ 309.
- [42] Webb L E, Graham S A, Johnson C L, Badarch G, Hendrix M S. Occurrence, age, and implications of the Yagan Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia. *Geology*, 1999, 27: 143 ~ 146.
- [43] Davis G A, 8 others. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison T M (eds.), *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press, 1996. 253 ~ 280.
- [44] Davis G A, Zhang Y, Zhang C, Xu B. The Mesozoic Fengjing-Longhua and Jiaoqier fault zones, north China: New interpretations of controversial structures. *Geol. Soc. Am. Abstr. Progr.*, 2001, 33 (3): 49.
- [45] Davis G A, Wang C, Zheng Y, Zhang J, Gehrels G E. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: new views on its intraplate contractional styles. *Geology*, 1998, 26: 43 ~ 46.

MESOZOIC N-S EXTENSION IN THE EASTERN ALTYN TAGH RANGE ON THE NORTHERN MARGIN OF THE QINGHAI-TIBET PLATEAU

CHEN Xuan-hua¹, AN Yin², George E. GEHRELS³, Eric S. COWGILL², Marty GROVE²,
T. Mark HARRISON², WANG Xiao-Feng¹, YANG Nong¹, LIU Jian¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Department of Earth and Space Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, USA;* 3. *Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA)*

Abstract: Lying in the eastern Altyn Tagh Range along the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, the >300-km long, E-W-trending Lapeiquan fault is a south-dipping normal fault, with its dip angle as low as <30°. The central segment of the fault is a 30 ~ 50 m thick ductile shear zone with a well-developed mylonitic fabric and stretching mineral lineation, whereas the eastern and western segments are characterized by cataclastic deformation. The kinematic indicators such as asymmetric boudinage structure, asymmetric folds and minor brittle and ductile faults within the fault zone all indicate a hanging wall-south normal-slip sense of shear. The age of the Lapeiquan fault is constrained by two lines of evidence. First, a sequence of Early-Middle Jurassic sediments is locally present in the hanging wall of the Lapeiquan fault. The clasts of the Jurassic strata, particularly the stromatolite-bearing, cherty limestone and purple quartzite, can be correlated with those in the footwall of the fault. The Early-Middle Jurassic strata were probably deposited in an extensional basin above the Lapeiquan fault. Second, ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronological analyses indicate two prominent cooling events in the Lapeiquan footwall. The older event occurred in the latest Triassic-earliest Jurassic between ~220 and 187 Ma, while the younger event occurred in the late Early Cretaceous at ~100 Ma. Because the 220 ~ 187 Ma cooling ages are prevalent in the Lapeiquan footwall, they represent the main stage of faulting. The authors interpret the younger

phase of fault motion at ~ 100 Ma to have been related to fault reactivation. The deformation was aided by motion along the south-dipping Qiashikan normal fault that merges with the eastern Lapeiqan fault. The Mesozoic extension in the Qinghai-Tibet Plateau and other parts of East Asia may be summarized as back-arc extension resulting from northward subduction of the Tethyan oceanic plate and the westward subduction of the Pacific plate.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Altyn Tagh; extensional tectonics

新 书 介 绍

《西藏纳木错地区第四纪环境演变》一书由朱火岗、孟宪刚等著，2004年。北京：地质出版社。全书302页，共分十一章，彩色图版6幅，彩色附图2幅。

本书系国土资源大调查项目的研究成果。作者以翔实的第四纪地质、地貌、冰川资料为依据，综合应用区域地质构造背景、遥感影像解译、野外实测地层剖面、湖岸堤和湖岸阶地水准仪测量、地貌学、沉积学、矿物学、地球化学、同位素年代学与微体古生物学分析方法，将第四纪地质调查与沉积建造、生物地层、年代地层的定性与定量分析研究相结合，对藏北高原腹地纳木错地区晚更新世以来的湖泊演化、冰期划分、藏北高原古大湖变迁、古河流、古砾石层和经济地质等，及其环境生态效应与青藏高原隆升的关系等方面，进行了系统的分析与探讨，阐述了本区第四纪晚期以来环境演化的基本特征，建立了该区湖相地层的标准剖面，进行了冰期划分与对比，推测了在藏北高原存在一个晚更新世古大湖——古羌塘湖，提出了区域环境演化的基本规律、湖相沉积的方法研究和环境预测与评价的新思路。本书是一部全面、系统介绍西藏纳木错地区第四纪湖泊演化、冰川发育和环境演变的专著，汇集了作者多年辛勤的研究成果，可供从事第四纪地质、地貌、冰川地质、环境预测方面学习与研究的地质或地理院校师生、科研人员和相关人员阅读与参考。联系人：100081，北京海淀区民族大学南路11号中国地质科学院地质力学研究所孟宪刚。