

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩 增生地体及其动力学*

许志琴 徐惠芬 张建新 李海兵

朱志直 曲景川

(中国地质科学院地质所, 北京)

陈代璋 陈金禄

(中国地质大学, 北京)

杨开春

(青海省地矿局祁连二队, 祁连县)



北祁连走廊南山加里东火山岛弧带前缘为弧前俯冲杂岩增生地体。它由多重的增生火山岛弧、复理石增生楔、高压变质滑脱带及蛇绿岩残片组成, 为早古生代古祁连洋壳自 SW 往 NE 俯冲于阿拉善地块之下的结果。俯冲过程的高压变质阶段经历了中温高压的初期、降温增压的主期而进入降压增温的弛后期。提出了 450—500Ma 期间, 中祁连地块向北俯冲、阿拉善地块向南增生的海沟后退的俯冲动力学模式。

关键词 俯冲杂岩增生地体, 多重结构, 海沟后退的俯冲动力学

位于中朝板块西南部的北祁连是一条线性很强的造山带, 长期以来被当作是典型的加里东造山带。北祁连是中国大陆板块构造研究的摇篮, 70 年代初期肖序常等首先在北祁连发现了蓝闪石片岩带、蛇绿岩套及混杂堆积^[1,2]。近年来, 某些学者^[3-10]及我们的研究, 更证实该区早古生代的洋壳蛇绿岩、海沟、岛弧、增生楔、蓝闪石片岩、混杂堆积及弧后盆地的标志十分典型。北祁连走廊南山对研究中国造山带的古板块体制及俯冲动力学, 是一理想场所。

北祁连位于阿拉善地块及中祁连地块之间, 其北界以走廊过渡带与阿拉善地块相连,

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 4870127)

本文 1992 年 7 月收到, 1993 年 5 月改回, 王毅编辑。

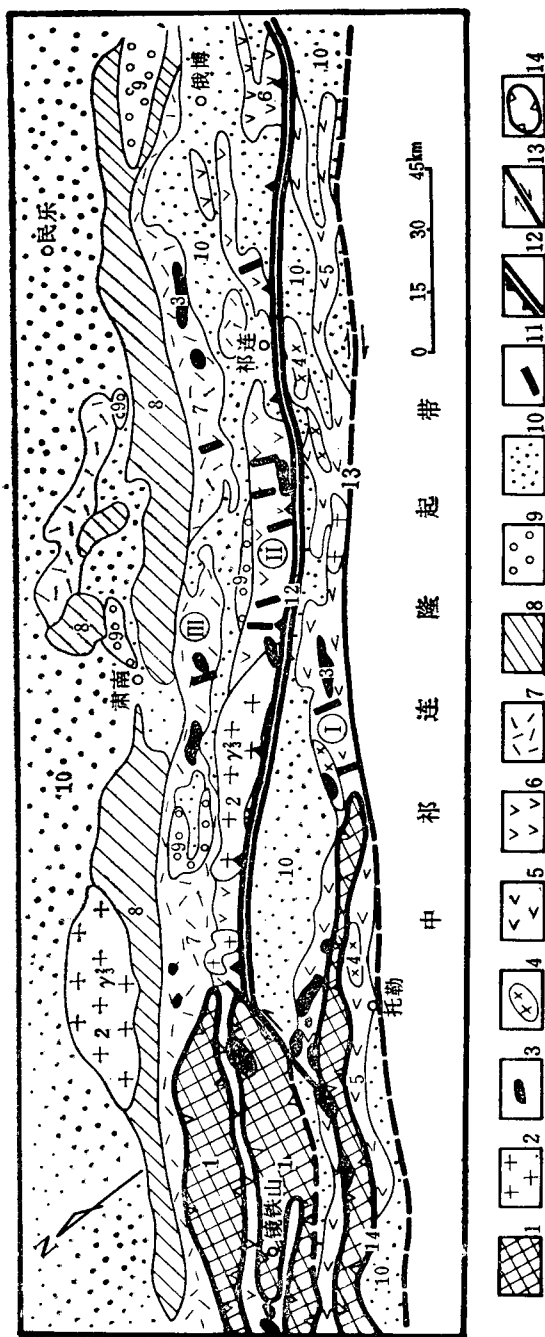


图 1 北祁连造山带的构造单元图

Fig. 1 Sketch map showing tectonic units of the northern Qilian orogenic belt

1. 前寒武纪地体; 2. 花岗岩; 3. 超基性岩; 4. 辉长岩; 5. 大洋火山岩; 6. 岛弧火山岩; 7. 弧后火山岩; 8. 志留纪复理石; 9. 泥盆纪磨拉石; 10. 上叠盆地 (C-N); 11. 横向拉伸线理; 12. 俯冲杂岩增生地体; 13. 右行平移韧性剪切带; 14. 推覆体;

N. QL——北祁连； C. QL——中祁连； ① 托莱山蛇绿岩带； ② 走露南山火山岛弧及俯冲杂岩增生地体； ③ 走露南山北缘弧后盆地； ④ 托莱山蛇绿岩带； ⑤ 托莱山蛇绿岩带； ⑥ 托莱山蛇绿岩带； ⑦ 托莱山蛇绿岩带； ⑧ 托莱山蛇绿岩带； ⑨ 托莱山蛇绿岩带； ⑩ 托莱山蛇绿岩带； ⑪ 托莱山蛇绿岩带； ⑫ 托莱山蛇绿岩带； ⑬ 托莱山蛇绿岩带； ⑭ 托莱山蛇绿岩带； ⑮ 托莱山蛇绿岩带； ⑯ 托莱山蛇绿岩带； ⑰ 托莱山蛇绿岩带； ⑱ 托莱山蛇绿岩带； ⑲ 托莱山蛇绿岩带； ⑳ 托莱山蛇绿岩带； ㉑ 托莱山蛇绿岩带； ㉒ 托莱山蛇绿岩带； ㉓ 托莱山蛇绿岩带； ㉔ 托莱山蛇绿岩带； ㉕ 托莱山蛇绿岩带； ㉖ 托莱山蛇绿岩带； ㉗ 托莱山蛇绿岩带； ㉘ 托莱山蛇绿岩带； ㉙ 托莱山蛇绿岩带； ㉚ 托莱山蛇绿岩带； ㉛ 托莱山蛇绿岩带； ㉜ 托莱山蛇绿岩带； ㉝ 托莱山蛇绿岩带； ㉞ 托莱山蛇绿岩带； ㉟ 托莱山蛇绿岩带； ㊱ 托莱山蛇绿岩带； ㊲ 托莱山蛇绿岩带； ㊳ 托莱山蛇绿岩带； ㊴ 托莱山蛇绿岩带； ㊵ 托莱山蛇绿岩带； ㊶ 托莱山蛇绿岩带； ㊷ 托莱山蛇绿岩带； ㊸ 托莱山蛇绿岩带； ㊹ 托莱山蛇绿岩带； ㊺ 托莱山蛇绿岩带； ㊻ 托莱山蛇绿岩带； ㊼ 托莱山蛇绿岩带； ㊽ 托莱山蛇绿岩带； ㊾ 托莱山蛇绿岩带； ㊿ 托莱山蛇绿岩带； 1. Precambrian terranes; 2. granites; 3. ultrabasic rocks; 4. gabbros; 5. marine volcanic rocks; 6. island-arc volcanic rocks; 7. back-arc volcanic rocks; 8. Silurian flysch; 9. Devonian molasse; 10. superposed basin; 11. cross stretching lineations; 12. accretionary terrane of the subduction complex; 13. dextral strike-slip ductile shear zone; 14. nappe

N. QL—Northern Qilian; C. QL—Central Qilian;

① Tuolaishan ophiolite zone; ② Zhoulangnanshan volcanic island arc and accretionary terrane of subduction complex; ③ Zhoulangnanshan north slope back-arc basin

南界以托莱山大型右行平移韧性剪切带与中祁连地块毗邻。在前人研究基础上^[1-10], 我们又进一步将北祁连中西段划分为 8 个构造单元: ① 托莱山蛇绿岩带, 具大洋及洋岛性质, 时代寒武-奥陶纪; ② 走廊南山俯冲杂岩增生地体, 代表了南北板块之间聚敛边界俯冲增生作用及铲刨作用产物, 俯冲时限为 415—450Ma ($\text{Ar}^{39}\text{-Ar}^{40}$ 方法, Maluski 和陈文, 1985, 1990); ③ 走廊南山火山岛弧带, 为典型的玄武岩-安山岩-流纹岩组合, 具岛链特征, 形成时代大致为中寒武世至早奥陶世; ④ 走廊南山北坡为弧后盆地, 具枕状构造的基性海相熔岩、超基性岩与奥陶纪海相复理石共生, 并具初始洋壳性质; ⑤ 志留纪残余海盆区; ⑥ 泥盆纪磨拉石盆地; ⑦ 后泥盆纪上叠陆相盆地; ⑧ 镜铁山“扩展式”推覆体, 由前寒武纪含铁变质岩系组成的外来体, 叠覆于寒武-奥陶纪、蛇绿岩及火山岛弧之上, 推测其为后期中祁连隆起过程中向北扩展而形成的推覆体, 有可能与阿尔金断裂的平移作用有关(图 1)。

研究表明, 位于阿拉善地块及中祁连地块之间的早古生代洋盆曾经历了加里东期洋盆消减、洋壳往北俯冲与板块碰撞以及加里东期后的陆内会聚阶段。华力西时期大规模的走滑作用、形成的构造变形及新生代以来的逆冲断层均叠置在加里东期构造之上, 使早期形成的向南指向的不对称叠覆板片构造变得更加复杂, 不仅发生板片之间旋转(右行走滑的转换), 并且最后使山体往北逆冲倒伏在酒泉新生代陆相含油盆地之上, 整个山体呈现扇形结构特征。

加里东阶段是北祁连造山过程中的最重要阶段, 使该区发生大规模的褶皱作用、变质作用、火山活动、韧性剪切应变及花岗岩侵位。

1 走廊南山俯冲杂岩增生地体的结构

现代板块活动边缘的岛弧、海沟及弧前盆地的构造、沉积及变质作用是当前地球科学研究的热门之一, 特别是弧前增生俯冲杂岩体(或地体)概念的提出(J. K. Leggett, A. Taira et al; L. D. Kulm et al; G. K. Westbrook, 1982)^[11] 不仅对探索板块俯冲运动学及动力学有重要意义, 而且对重塑造山带中古弧前构造奠定了基础。

北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体为 NW-SE 向条状楔形体, 它位于托莱山蛇绿岩带以北、走廊南山火山岛弧带以南。自 NW 向 SE 经石油沟—一边马沟—清水沟—香子沟—百经寺—郭米寺—景阳岭南—兰皋, 被 WNW-ESE 向中祁连北缘(托勒牧场—兰皋)右行平移韧性剪切带所截切, 东延情况不详。该地体包含高压蓝闪石片岩带、增生火山链、混杂堆积岩、基性超基性岩块(190 个)以及由滑塌堆积, 浊流沉积及复理石组成的增生楔, 为一个宽 10—15km 复杂的俯冲杂岩体系。

该地体位于加里东板块聚敛部位, 由于洋壳俯冲、铲刨, 不断在弧前增生而形成了“增生楔形体”。我们现在所见到的部分, 即为弧前增生体的深部, 后经造山作用上升而裸露的部分。在俯冲机制作用下, 弧前增生体实为一个庞大的韧性剪切滑脱带体系, 它不仅具有“多重”“叠瓦式”结构, 并且具有强烈的深部高压塑性流变及剪切应变的特征。

笔者详细研究了北祁连山中西段, 特别是祁连县附近, 具南北向八条沟的构造、变质及沉积特点, 解剖了俯冲杂岩增生地体的结构组成(图 2)。

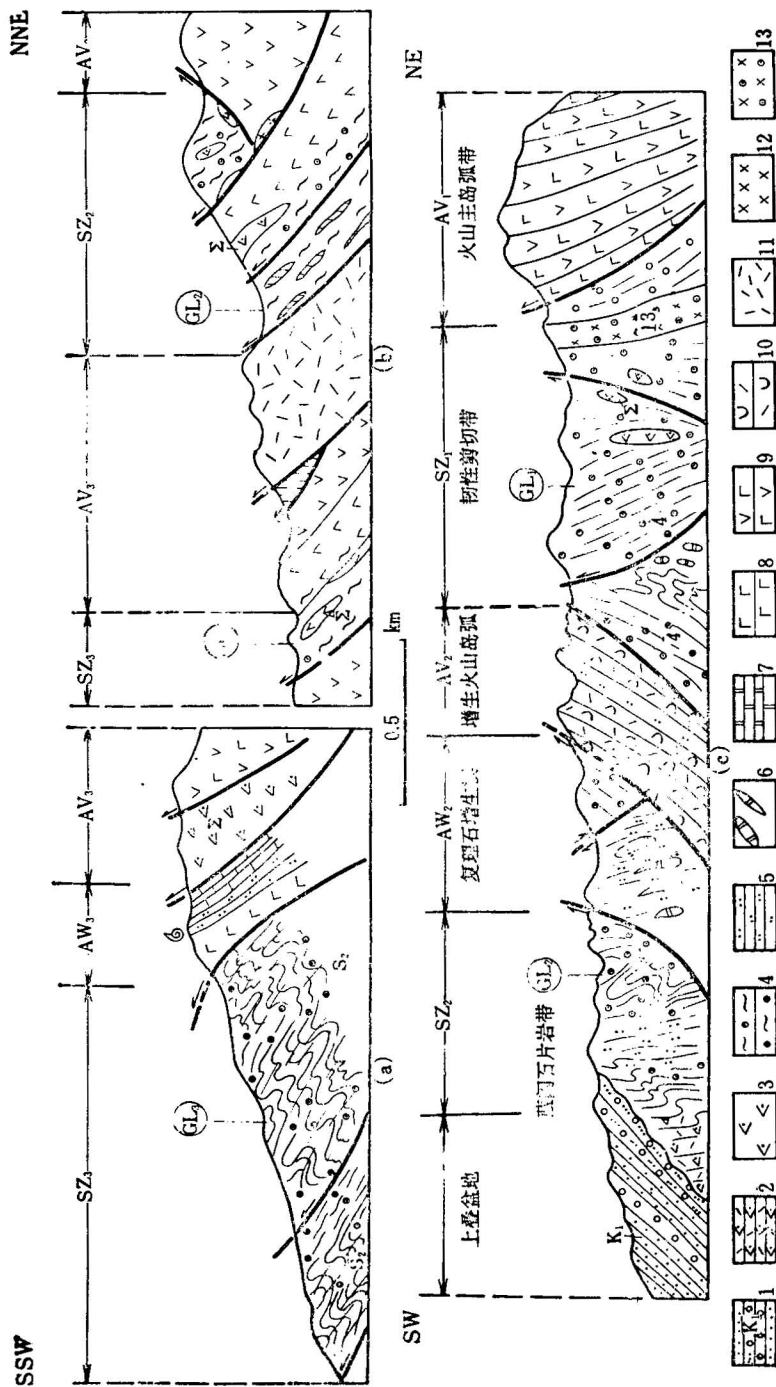


图 2 走廊南山俯冲杂岩增生地体横剖面图

Fig. 2 Cross sections of the Zhoulangnanshan accretionary terrane of subduction complex

(a) 祁连县百谷寺剖面; (b) 祁连县郭米寺剖面; (c) 祁连县小角儿沟剖面; 1. 下白垩统砂砾岩; 2. 滑石菱镁片岩; 3. 超基性岩; 4. 蓝闪石片岩; 5. 硅质岩; 6. 大理岩透辉体; 7. 大理岩; 8. 基性火山岩; 9. 中基性火山岩; 10. 中酸性火山岩; 11. 酸性火山岩; 12. 辉长岩; 13. 含磁柱石钠闪片岩; SZ₁, SZ₂, SZ₃——俯冲型韧性剪切带(①、②、③), 分别由蓝闪石片岩带(GL₁, GL₂, GL₃)及超基性岩片岩带与混杂堆积岩组成; AW₁, AW₂, AW₃——复理石增生楔; AV₁——走廊南山火山岛弧带; AV₂, AV₃——增生火山岛弧

(a) Baijinsi section, Qilian County; (b) Goumisi section, Qilian County; (c) Xiaoyuergou section, Qilian County; 1. Lower Cretaceous sand stone, and conglomerates; 2. listwanites; 3. ultrabasic rocks; 4. glaucophane schists; 5. siliceous rocks; 6. marble lens; 7. marbles; 8. basic volcanic rocks; 9. intermediate-basic volcanic rocks; 10. intermediate-acidic volcanic rocks; 11. acidic volcanic rocks; 12. gabbros; 13. magnetorite-bearing rocks containing lawsonites; SZ₁, SZ₂, SZ₃——subduction type ductile Shear zone(①, ②, ③) composed respectively of glaucophane zones (GL₁, GL₂, GL₃), remnant slices of ultrabasic rocks and mélanges; AW₁, AW₂, AW₃——flysch accretionary wedges; AV₁——Zhoulangnanshan volcanic island arc zone; AV₂, AV₃——accretionary volcanic island arcs

1.1 蓝闪石片岩带 (GL)

平面上主要出露有 3 条高压蓝闪石片岩带; 发现的高压变质矿物有蓝闪石、青铝闪石、多硅白云母、硬绿泥石、硬柱石、文石及红帘石等, 原岩成分为泥砂质沉积岩、碳酸盐岩、硅质岩、部分中酸性及中基性火山岩^[8-9]。高压变质带的置换面理大部分倾向 NE, 局部因后期构造变动而改变方向。蓝闪石片岩带是俯冲作用过程中快速滑移的滑脱带, 它构成了俯冲型高压韧性滑脱剪切带体系。

1.2 混杂堆积带 (Mel)

以泥砂质及火山质岩石为基质, 夹杂基性岩、超基性岩、榴辉岩、硅质岩及灰岩等大小不同的混杂碎块(图 2), 基质成分经不同程度变质已成为蓝片岩及绿片岩。混杂堆积经强烈变形劈理化, 常与蓝闪石片岩带共生, 它是板块俯冲过程中沿滑脱带铲刨作用的产物。

1.3 增生火山链 (AV)

位于走廊南山北缘火山主岛弧带南侧, 被一系列高压韧性剪切带所间隔, 由玄武-安山-流纹质火山角砾岩、凝灰岩及熔岩组成。中酸性火山岩中 $\text{Na}_2\text{O} \gg \text{K}_2\text{O}$, 呈现轻稀土 (LREE) 富集、重稀土 (HREE) 亏损, 轻重稀土分馏和铕负异常的稀土分布图式。被蓝闪片岩间隔的不连续中基-中酸性火山岩带, 为火山主岛弧带 (AV_1), 在俯冲过程中向南增生的新火山链(图 2 中 AV_2 、 AV_3)。

1.4 弧前复理石增生楔 (AW)

在图 2 剖面上, 弧前复理石增生楔 (AW) 与增生火山链 (AV) 伴生, 以蓝片岩带为底界, 由滑塌堆积, 浊流沉积及复理石沉积组成的楔体。下柳沟滑塌堆积中灰岩楔体呈透镜体块平行山脉方向展布, 最长可达 700m, 内含重力滑动构造; 小鱼儿沟剖面中发现由黑色硅质岩、铁碧玉及变砂岩组成的深水浊流相, 其中夹杂大量硅质大理岩块体的滑塌沉积。

图 2 明显反映了俯冲杂岩增生地体结构的多重性及叠瓦性, 自 NE 到 SW 的逆冲断层(韧性)及 SW 到 NE 的滞后反冲断层(韧-脆性)构成楔体的构造格架。

2 俯冲杂岩增生地体的变形构造分析

2.1 置换面理构造

本区普遍发育两期置换面理, S_1 为渗透性流劈理, S_2 为具间隔注质的折劈理, 两组面上均发现高压变质矿物(蓝闪石、多硅白云母及红帘石等)。 S_2 面理在剪切带中心大部分向北东缓倾, 剪切带边部逐渐变为陡倾, 表明 S_2 在垂向上具“S”形特征。估计 3 条蓝闪石片岩带面理总厚度为 2.5km。

2.2 横向拉伸线理

沿走廊南山俯冲杂岩带,普遍发现垂直山链方向的横向拉伸线理,发育在 S_1 或 S_2 置换面理上,总的优选方位为 $NNE20^\circ-NE40^\circ$ 。拉伸线理的主要标志: 蓝闪石定向拉伸(最长达 1.5cm); 火山角砾定向拉伸(截断处有纤维状石英、方解石晶体所充填);石英脉的布丁构造及黄铁矿与石榴石的压力影构造。

区域性横向拉伸线理的发现是反映板块聚合的剪切矢量最直接的佐证。

2.3 褶皱构造

普通发育两期同劈理叠加褶皱,早期 (F_1) 以紧闭的枢纽平行拉伸线理的“A”型平卧(近平卧)褶皱为特征,后期 (F_2) 发育A型、AB型及B型剪切褶皱,并发现上述褶皱类型的发育与岩石能干性及远离韧性剪切带主界面的距离有关。在清水沟—石头沟—香子沟一带的糜棱岩化蓝闪石石英片岩中,由蓝闪石组成的 S_1 面理又重褶形成 F_2 平卧褶皱,伴随 S_2 折劈理,劈理面上大量蓝闪石矿物呈 $NE30^\circ$ 方向排列,褶皱枢纽平行、斜交及垂直拉伸线理方向,这表现两期褶皱与拉伸线理的形成都与剪切应变有关。

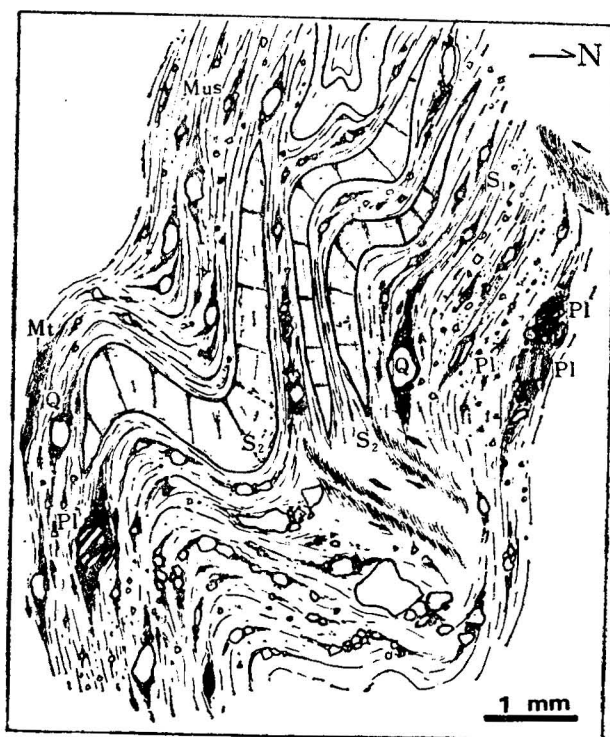


图3 祁连清水沟蓝闪石片岩的微构造特征

Fig. 3 Microstructure characteristics of glaucophane schists in Qingshuigou, Qilian County

Q——石英; Pl——斜长石; Mt——磁铁矿; Mus——白云母; S_1, S_2 ——第一、二劈理
Q——quartz, Pl——plagioclase, Mt——magnetite, Mus——muscovite, S_1, S_2 ——the first period
and second period cleavages

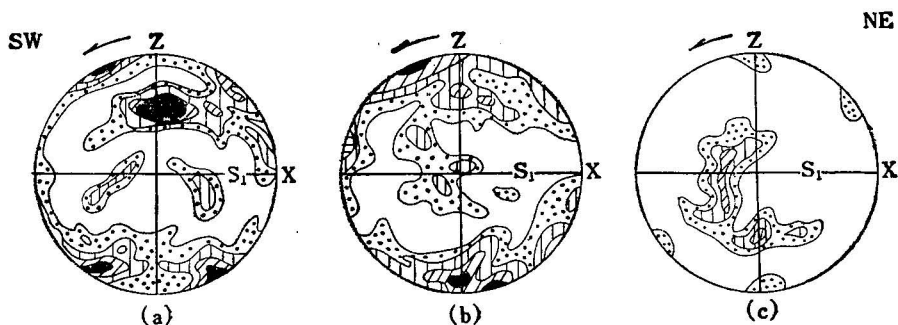


图 4 祁连清水沟蓝闪石片岩带石英组构

Fig. 4 Quartz fabrics of glaucophane schists in Qingshuigou, Qilian County

(a) IV-10-4c, 150 颗粒, 下半球投影 1—3—5—9%;

(b) IV-10-5e, 150 颗粒, 下半球投影 1—3—5—9%;

(c) IV-10-7c, 120 颗粒, 下半球投影 1—3—7%

(a) IV-10-4c, 150 quartz grains, lower hemisphere projection, 1—3—5—9%; (b) IV-10-5e, 150 quartz grains, lower hemisphere projection, 1—3—5—9%; (c) IV-10-7c, 120 quartz grains, lower hemisphere projection, 1—3—7%

2.4 剪切指向的判断

野外及镜下大量旋转应变主要表现为 XZ 面上雁列状石英脉, S-C 构造、石榴石压力影及旋转布丁构造等, 并且发现两期应变的剪切指向均为 NE-SW 向。图 3 可作为微构造标志的典例: 沿着清水沟蓝闪石片岩中重褶的 S_1 面, 可以重塑褶皱各部位的早期剪切指向为 NE→SW, “S” 形的 S_2 劈理又指示了相同方向的继续剪切应变。剪切指向的微构造特征与清水沟蓝闪石片岩中石英组构运动学分析一致, 组构类型为中低温 ($< 350^\circ\text{C}$ 及 $350^\circ\text{—}450^\circ\text{C}$) 底面及菱面组构, 指向 SW。与所发现的少量相反旋转应变一样, 石英组构中也出现相反运动学(即指向 NE), 这可以解释为同一俯冲作用下逆反效应或后期存在正向滑移的叠加(图 4)。

2.5 变形机制

火山增生链中火山角砾的有限应变分析露头取自清水沟及上香子沟, 采用 Dunnet 的变形砾石测量方法分别获得富林指数 K 为 1.25 及 1.6, 证实了简单剪切机制(或简单剪切+轻微压扁机制)的存在(图 5)。

3 俯冲杂岩增生地体中的高压变质作用

沿北祁连加里东俯冲带分布的 3 条蓝闪石片岩及其所包含的高压变质矿物组合, 表明伴随俯冲的高压低温变质作用的存在。

3.1 俯冲带的叠加变质作用

俯冲带的变质作用具多期及叠加性。

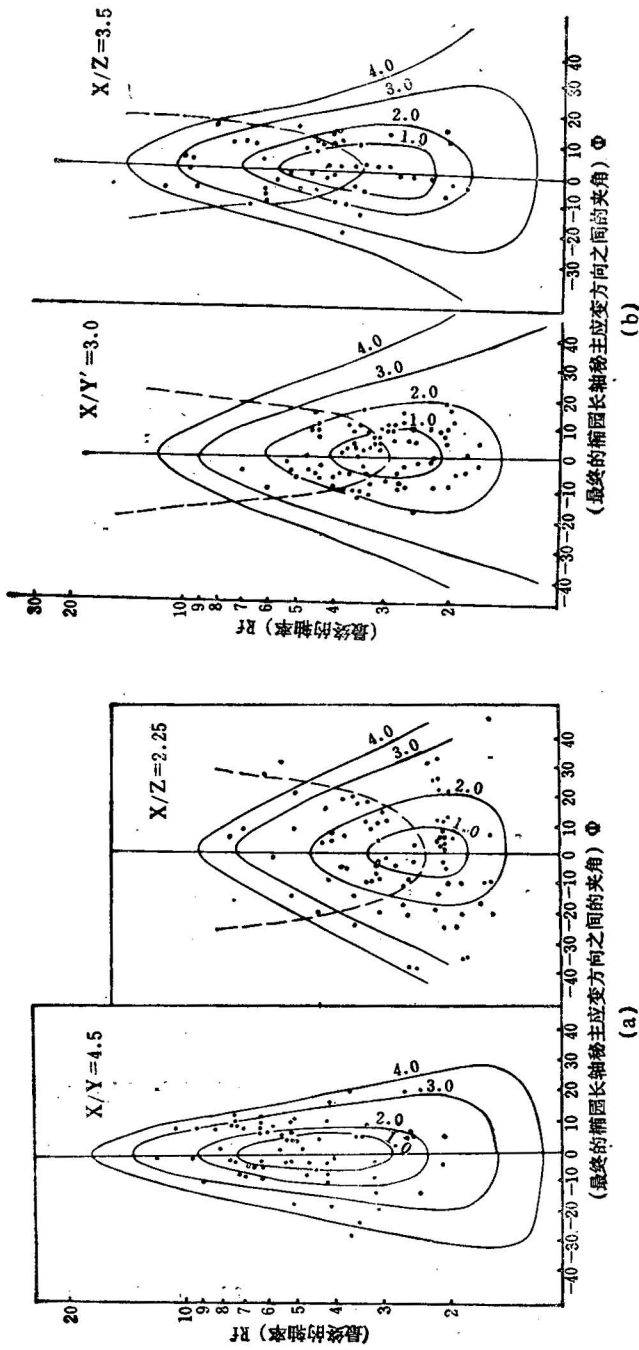


图 5 俯冲型韧性剪切带内变形砾石的有限应变分析 (Dunnet 法)

Fig. 5 Finite strain analyses of deformed pebbles in subduction type ductile shear zones

(a) 清水沟口变形砾石的有限应变测量; (b) 上香子沟口变形砾石的有限应变测量

(a) Finite strain measurement of deformed pebbles in Qingshuigou; (b) finite strain measurement of deformed pebbles in Xiangzigou

第一期 (M_1) 为低温低压变质作用, 以绿片岩相为特征。

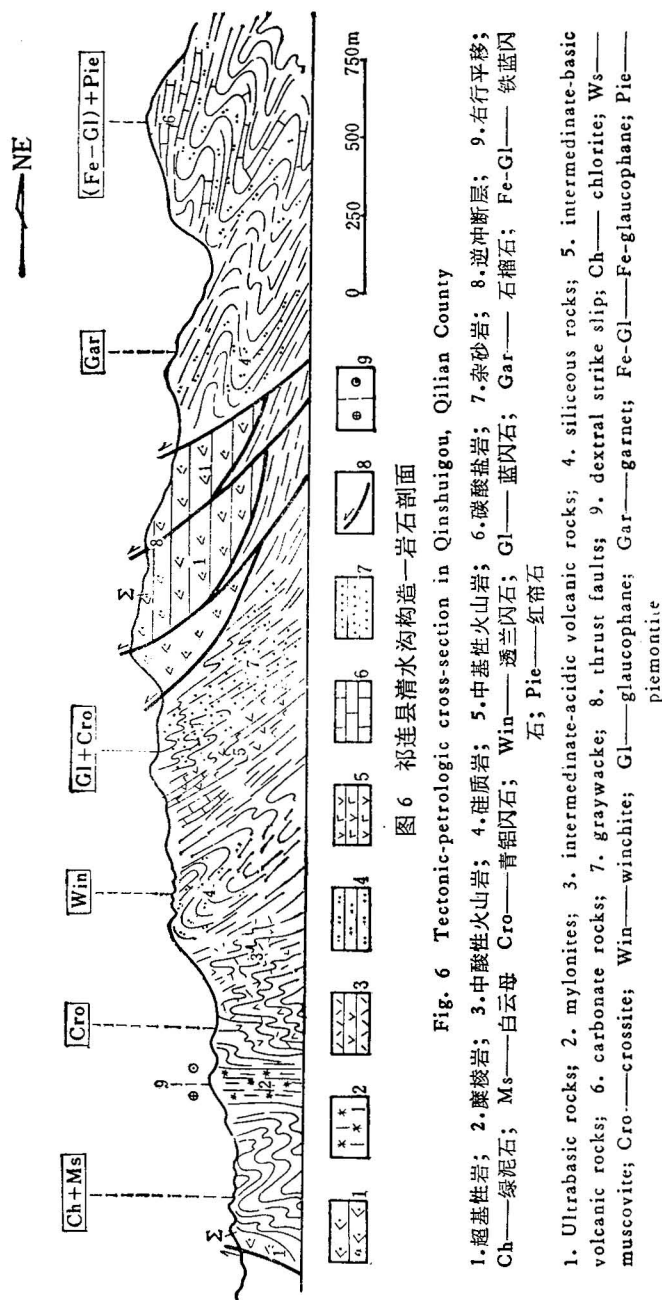
第二期 (M_2) 为低温高压变质作用, 以蓝闪片岩-蓝闪绿片岩相的过渡相系为特征。

高压变质阶段 (M_2)

的典型岩石有蓝闪片岩、白云蓝闪-蓝闪白云片岩、石磨蓝闪片岩、蓝透闪石英岩-大理岩、含硬玉的青铝闪石岩和C类榴辉岩。这些岩石所含高压矿物主要有碱性闪石类的蓝闪石-铁蓝闪石和青铝闪石, 钠钙闪石类的蓝透闪石。其它典型高压矿物, 如大的铁铝榴石和大的多硅白云母, 铁-锰铝榴石、红帘石, 文石和硬绿泥石等常常显示一定的岩石专属性, 大的铁铝榴石和大的多硅白云母主要产于中一基性组分的岩石中, 红帘石产于硅质岩或少量中酸性岩石中, 文石富集于碳酸盐岩石中, 小颗粒的锰铝榴石多数分布于硅质岩中。

第三期 (M_3) 为退变质的低温低压绿片岩相。

俯冲剪切机制导致的高压低温变质作用 (M_2) 叠加在低温低压绿片岩相变质作用 (M_1) 之上, 以后又退变到绿片岩相 (M_3)。 $M_1 \rightarrow M_2$, 表现为逐渐的压力递进, 如清水沟剖面(图 6)中, 在大量



蓝闪石和多硅白云母出现前, 第一个火山岩组合顶部就在消耗绿泥石和白云母基础上开始长出细小 ($<0.05\text{mm}$) 的青铝闪石。 $M_1 \sim M_3$ 的变化更是处处可见, 特别是矿物反应和成分环带十分清楚, 如石榴石单颗粒核部 $\rightarrow$ 边部 MnO 含量渐次降低, 在祁连清水沟南的

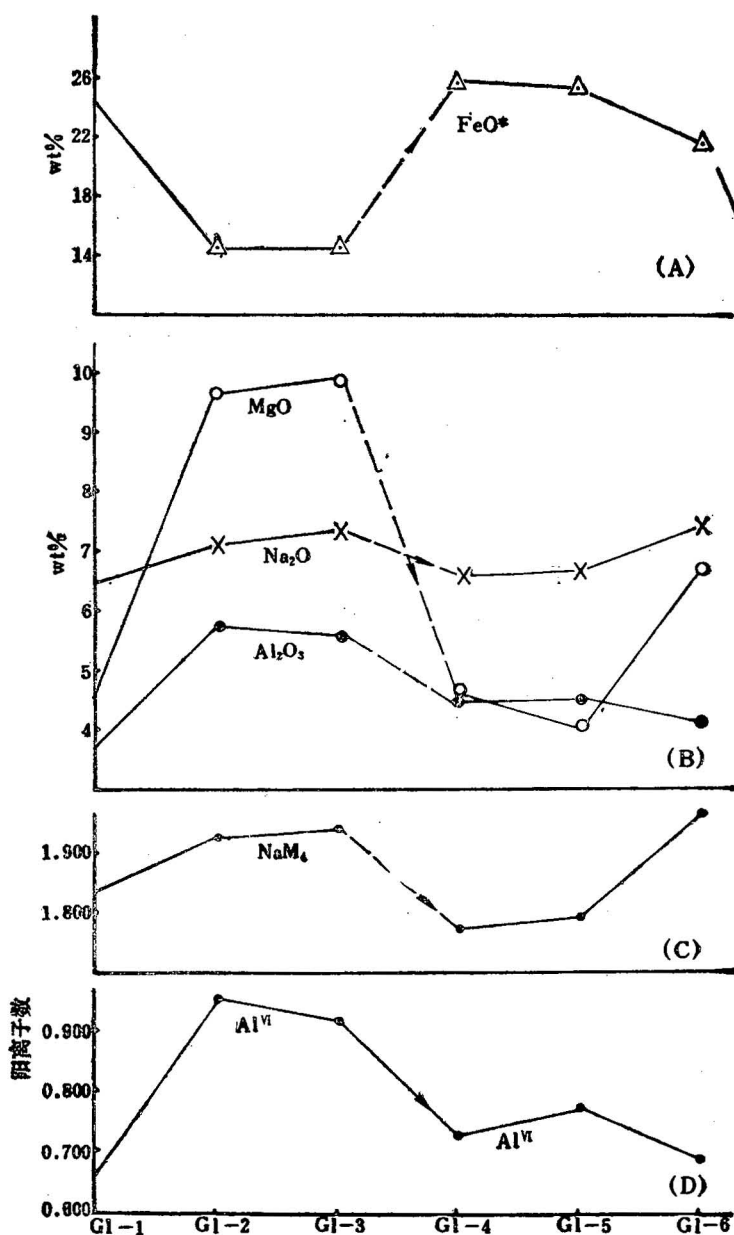


图7 碱性闪石在高压变质作用 (M_2) 的弛后期 (H_2) 环带成分变化图

Fig. 7 Diagram showing variation of zonal composition of alkali amphibole during the lag stage of high-pressure metamorphism

(A) (B) 为氧化物 (FeO^* , MgO , Na_2O , Al_2O_3) 重量百分数的变化; (C) (D) 为 NaM_4 及 Al^{VI} 阳离子数的变化 本样品相当于表 1 中 4 号样品, G1-1—G1-3, 内环从核部到边部, G1-4—G1-6, 外环从里到外, 阳离子数按 23(O) 计算。

(A) and (B) are variation of oxides (FeO^* , MgO , Na_2O , Al_2O_3) wt%; (C) and (D) are variation of NaM_4 and Al^{VI} cation number; This sample is equal to sample 4 of Table 1. G1-1—G1-3, from nucleus to the margin in inner zone, G1-4—G1-6, from inside to outside in outer zone, cation number calculated according to 23 (O)

N-52 号样品中 (图 7), 石榴石核部 $\text{MnO} = 30.20\%$, 经过 24.94% 到边部为 20.81% , 显示了 $M_2 \rightarrow M_3$ 出现温度升高压力降低的逐级变化的趋势。

3.2 俯冲带高压变质阶段 (M_2) 的演化

高压变质作用 (M_2) 与深部俯冲造成的剪切变形事件基本和谐一致。根据祁连清水沟蓝闪石片岩带 (南带) 变形及变质作用的解析, M_2 又可明显地分出 3 个不断演化的阶段:

3.2.1 高压变质作用初期 (H_1): 形成高压矿物多硅白云母和青铝闪石, 在塑性变形中沿 S_1 面分布。蓝闪石含 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 7\% - 8\%$ (wt%), 多硅白云母的 $\text{Si} = 3.16$, $b_0 = 9.031 \text{ \AA}$, 运用石榴石-青铝闪石地质温度计 (Перчук, 1969) 和 Al_2O_3 及 $\text{NaM}_4\text{-Al}^{\text{IV}}$ 等压力计, 估算的顶峰温压条件压力 $P = 0.65 \text{ GPa} \pm$, 温度 $T = 400^\circ\text{C} \pm$ 。

3.2.2 高压变质作用主期 (H_2): 形成大的蓝闪石-青铝闪石和多硅白云母的晶体。蓝闪石的 c 轴平行韧性剪切主应变的拉伸线理, 并伴随的第二期剪切褶皱。蓝闪石的 Al_2O_3 含量最高达 11.34% (wt%, 探针分析, 表 1 中 3 号样品中的 H_2), 基性岩石中蓝闪石 Al_2O_3 达 10.46% (wt%, 湿化学分析), 多硅白云母的 $\text{Si} = 3.34 - 3.49$, $b_0 = 9.055 \text{ \AA}$, 因此, H_2 所对应的顶峰温压条件压力 $P = 0.75 \text{ GPa}$, 温度 $T = 300^\circ\text{C} \pm$ 。

表 1 蓝闪石阳离子数
Table 1 Cations of glaucophane

序号	1		2		3		4					
样品号	IV-59		IV-56		IV-52		Q90-55					
闪石编号	H_1	H_2	H_2	H_3	H_2	H_3	H_3					
							Gl_1	Gl_2	Gl_3	Gl_4	Gl_5	Gl_6
Si	8.105	7.915	8.068	8.126	7.872	7.999	8.159	8.215	8.222	7.971	8.041	8.138
Al^{IV}		0.085			0.128	0.001	0	0	0	0.029	0	0
Al^{VI}	1.180	1.449	1.053	1.097	1.742	1.961	0.663	0.957	0.927	0.736	0.780	0.693
Ti	0	0.013	0	0.007	0	0.004	0.004	0	0.009	0.005	0.002	0.009
Fe	2.071	1.971	1.820	1.559	1.662	1.143	3.031	1.694	1.679	3.142	3.134	2.620
Mn	0.035	0.004	0.022	0.046	0.011	0	0.029	0.023	0.024	0.010	0.010	0.040
Mg	1.773	1.452	2.271	2.363	1.535	1.840	1.037	2.049	2.079	0.991	0.887	1.410
Ca	0.043	0.049	0.059	0.090	0.100	0.035	0.155	0.072	0.067	0.221	0.207	0.037
Na	2.149	2.039	2.226	2.056	2.192	2.046	1.875	1.960	1.992	1.861	1.905	2.050
K	0.002	0	0	0	0	0	0.017	0.013	0	0.030	0.013	0.004
Cr	0	0.022	0	0	0.023	0.004	0.030	0.019	0	0.003	0.021	0
NaM_4	1.957	1.951					1.845	1.928	1.933	1.779	1.793	1.963

表注: 1—3 样品采自祁连县清水沟, 4 号样品采自清水沟北沟; 原岩: 1 和 4 为不纯的硅质岩; 2 号酸性火山岩; 3 号中基性岩。 H_1 、 H_2 、 H_3 分别代表高压变质作用 3 个阶段, 表内数据均为探针分析结果 (按 23(O) 计算阳离子数) (北京中国地质大学探针室分析)

Note: Samples 1—3 are from Qingshuigou, Qilian County; protolith: Sample 1 and sample 4 are impure siliceous rock; sample 2: acidic volcanic rocks; sample 3: intermediate basic volcanic rocks. H_1 , H_2 , and H_3 represent respectively three stages of high-pressure metamorphism. All data in Table 1 are results of electron probe analysis (calculated according to 23(O)) (Lab. of Electron Probe, China University of Geosciences, Beijing)

3.2.3 高压变质作用弛后期 (H_3): 类同于 H_2 形成蓝闪石、多硅白云母及文石等大的晶体, 其中蓝闪石表现为明显的成分和光性环带。以清水沟北沟的硅质岩为例, H_3 时形成的铁闪石中(表 1 中 4 号样品), 从光性上首先分出 2 个界限平直的环带(内环和外环), 化学成分的变化表现为: 内环从核部到边部 (G1-1—G1-3), MgO 含量增高到稳定(图 5), FeO^* 降低到稳定, 而 Al_2O_3 、 Na_2O 和 Al^{VI} 及 NaM_4 值均从增高到稳定; 外环从核部到边部 (G1-4—G1-6), MgO 、 Al_2O_3 和 Na_2O 含量急剧下降后转为升高, Al_2O_3 含量变化很小。这种内环和外环成分演化的趋势不同, 反映了第一阶段升温升压→等温等压, 第二阶段为降温略升压→升温略降压的物理条件。上述可见, H_3 对温度的变化起了主导的作用, 其它, 如流体条件、化学组分的变化可能都处于动荡的环境, 促使 H_3 形成的温压条件变化于压力 $P = 0.7 \sim 0.75 GPa$, 温度 $T = 300 \sim 400^\circ C$ 之间。

3.3 俯冲带的 PTt 轨迹

根据同位素地质年龄数据, 祁连县清水沟白云母蓝闪片岩中的蓝闪石为 $454 Ma$, 多硅白云母获得 $439 Ma$ ($K-Ar$ 法)^[10], 另外蓝闪片岩中多硅白云母 Ar^{39}/Ar^{40} 获得 $448.6 \pm 11 Ma$ (Liou, Wang 和 Coleman, 1989)^[12], 由于目前同位素年龄测试技术的限制还无法确定 H_1 、 H_2 和 H_3 各自的年龄, 仅根据以上数据推断, 北祁连俯冲型韧性剪切带活动的持续时间至少有几个百万年, 本专题测得清水沟白云母蓝闪片岩中多硅白云母 Ar^{39}/Ar^{40} 年龄为 $406 \pm 3.89 Ma$ (中国地质科学院地质所同位素室测定), 挑选的多硅白云母单矿物不可避免地有 M_3 绿片岩相的退变产物, 因此, 这个年龄值可能代表了俯冲根部回升的时间。

据变质反应及矿物环带等模拟的 PTt 轨迹, 显示由逆时针的升压降温逐渐演变为顺时针的略降压升温的趋势, 它重塑了北祁连高压变质带从不断俯冲→停驰→回返地表的造山全过程。

4 俯冲动力学模式

俯冲杂岩增生地体的结构、变形、变质及 $P-T$ 条件的解析为我们提供了俯冲动力学模式建立的前提。

4.1 俯冲过程

俯冲开始, 北祁连寒武纪时形成洋壳往北东沿海沟插入阿拉善地块之下, 首先在海沟浅部形成低温低压的绿片岩相 (M_1)。随着洋壳不断伸入俯冲带 $15 km$ 以下, 而进入高压变质阶段 (M_2); 初期 (H_1), 在剪切机制下 S_1 面上生成定向的小颗粒青铝闪石, 此时 $T = 400^\circ C$, $P = 0.65 GPa \pm$; 继续剪切, 洋壳伸入 $20 \sim 25 km$ (高压变质主期, H_2), 形成 S_2 面及大颗粒的定向青铝闪石及蓝闪石, 此时 $T = 300^\circ C$, $P = 0.75 GPa$ 。由于我们尚未进行与蓝闪石相伴生榴辉岩的 PTt 研究, 故对俯冲的最大深部不得而知。但可以推测, 高压变质主期的俯冲深度以榴辉岩形成深度 ($\sim 30 km$) 为限, $P \gg 0.75 GPa$ 。随后俯冲受阻、停驰、而转入高压变质弛后阶段 (H_3), 应力状态由动态由静态交替转化, 出现动荡环境, 此时, PT 产生升降转化, 流体作用, 化学组分也随之变动, 形成不定向具环

带的蓝闪石重结晶晶体, 环带结构所反映的增温环境可以看作俯冲产生的软化及剪切热效应。上述俯冲阶段生在 438—450Ma 期间, 自 400—410Ma (志留纪末) 开始的山体迴隆使俯冲带根部的高压变质岩石、榴辉岩及超基性岩残体上升, 普遍发生退变质作用 (M_3) (图 8)。

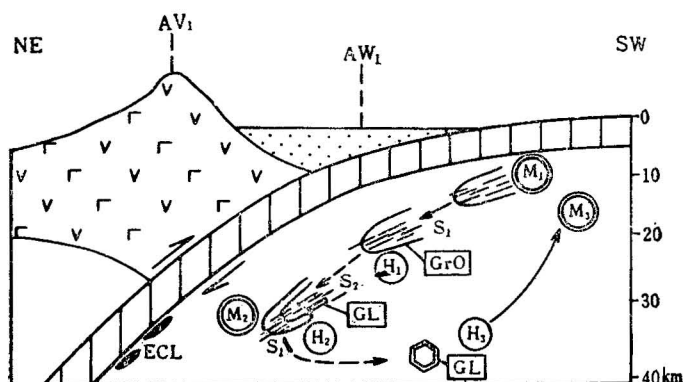


图 8 俯冲阶段的变形变质作用模式

Fig. 8 Deformation and metamorphism model of the subduction stage

AV₁——第一次俯冲生成的基性(为主)火山岛弧; AW₁——第一次俯冲生成的加积楔; Sb——俯冲带; M₁、M₂、M₃——俯冲带的三期变质作用; M₂ (高压变质期)分为初期 ⊕、主期 ⊕ 及弛后期 ⊕; S₁、S₂ 为第一、第二期面理; CrO——青铝闪石; GL——蓝闪石; ECL——榴辉岩

AV₁——basic volcanic island arc produced during the first subduction; AW₁——accretionary wedge produced during the first subduction. Sb——subduction zone; M₁, M₂, M₃——three periods of metamorphism of the subduction zone; M₂ (high-pressure metamorphism stage) is divided into ⊕ (the initial stage), ⊕ (the main stage) and ⊕ (the lag stage); S₁, S₂: the first-period and second-period foliation; CrO——crossite; GL——glaucophane; ECL——eclogite

4.2 “海沟倒退”俯冲动力学模式

由增生火山岛链、加积楔、高压带(韧性俯冲剪切带)及蛇绿岩残片组成的走廊南山俯冲杂岩增生地体的多重叠置结构是俯冲作用多次性的结果, 并非后期逆冲叠覆构造作用所致, 其主要原因: ①三条高压变质带所显示的压力不同, 中带的基性蓝闪石比南带更富 NaM₄, 石英岩中铁蓝闪石代替蓝透闪石; 北带的基性岩中出现硬柱石以及碳酸盐岩中大量文石。以上表明南带→中带→北带应力具增高趋势。②组成三条火山岛链 (AV₁、AV₂、AV₃) 的岩石特征不同, 自北往南, 由基性→中酸性→酸性变化。③走廊南山俯冲杂岩带以南的托莱山蛇绿岩带及俯冲杂岩带为奥陶纪洋盆开裂闭合的产物, 因此, 可以认为阿拉善陆缘在奥陶纪新洋盆扩张, 老洋壳(←)不断俯冲阶段, 可能由于俯冲海沟后退, 而拼贴了增生的火山弧 (AV₂、AV₃) 及加积楔 (AW₂、AW₃), 焊结了高压带及蛇绿岩残体, 形成了典型的“海沟倒退”模式(图 9)。火山岛弧带 (AV₁、AV₂、AV₃) 的不同岩性特征可能与“大陆增生”及“海沟倒退”速度之比有关, 当增生速度<倒退速度时, 为拉伸环境, 形成基性火山岩, 反之, 形成酸性火山岩。根据俯冲带的火山岛弧由基性→酸性转

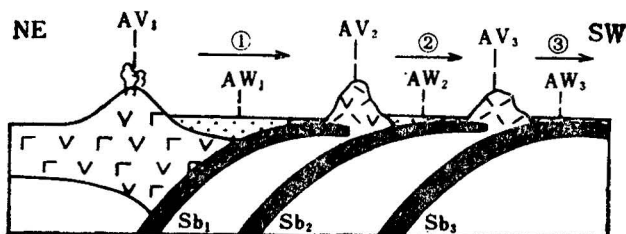


图 9 “海沟倒退”俯冲动力学模式

Fig. 9 “Retro-trench” subduction dynamic model

AV₁、AV₂、AV₃——三次俯冲形成的火山岛弧；AV₁→AV₃ 由碱性→酸性变化；AW₁、AW₂、AW₃——三次俯冲生成的加积楔；Sb₁、Sb₂、Sb₃——先后三次俯冲带

AV₁、AV₂、AV₃——Volcanic island arcs produced during the three subductions; AV₁→AV₃: basicity→acid; AW₁、AW₂、AW₃——accretionary wedges produced during the three subductions; Sb₁、Sb₂、Sb₃——three subduction zones

化,俯冲深度由深→浅(压力由大→小),倒退速度由大→小,表明在南面的奥陶纪洋盆扩张速度也可能自大渐小。“海沟倒退”俯冲动力学模式尚需进行俯冲带内各增生火山弧及增生楔的精确年龄测定予以进一步证实。

参 考 文 献

- 1 王 荃,刘雪亚. 我国西部祁连山古海洋及大地构造意义. 地质科学, 1976,(1): 42—55.
- 2 肖序常,陈国铭,朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质意义. 地质学报, 1978,52(4): 281—295.
- 3 宋志高. 北祁连山早古生代细碧岩-角斑岩及其与蛇绿岩套的关系. 地质科学院西安地质矿产研究所分刊, 1980,1(1): 14—24.
- 4 董必谦,邱凤歧. 北祁连蛇绿岩、蛇绿混杂岩及构造意义. 青藏高原地质文集(14). 北京: 地质出版社, 1984.
- 5 李舜贤. 北祁连山大柳沟火山洼地构造演化. 青海地质, 1988,(2): 24—35.
- 6 左国朝,刘寄陈. 北祁连早古生代大地构造演化. 地质科学, 1987(1): 14—24.
- 7 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991.
- 8 吴汉泉. 东秦岭和北祁连的蓝片岩. 地质学报, 1980,54(3): 195—207.
- 9 吴汉泉. 北祁连山高压变质带的岩石学及矿物学. 西安地质矿产研究所所刊, 1982, 4(7): 5—21.
- 10 夏林圻,夏祖春. 祁连、秦岭系海相火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991,233—239页.
- 11 Leggett, J k Trench-Forearc Geology: Sedimentation and Tectonics on Modern and Ancient Active Plate Margins. Published for the Geological Society of London by Blackwell Scientific Publications, 1982.
- 12 Liou J G, Xiaomin Wang, Coleman R G. Blueschists in major suture zones of China. Tectonics, 1989, 8(3): 609—619.

作 者 简 介

许志琴,女,生于1941年8月,1964年毕业于北京大学地理系,1964年调入北京地质科学院地质所主要从事构造地质学研究。1987年获法国理学博士,现任地质所研究员,岩石圈构造物理研究室主任。邮政编码: 100037。

THE ZHOULANGNANSHAN CALEDONIAN SUBDUCTIVE COMPLEX IN THE NORTHERN QILIAN MOUNTAINS AND ITS DYNAMICS

Xu Zhiqin, Xu Huifeng, Zhang Jianxin,
Li Haibing, Zhu Zhizhi, Qu Jingchuan,
(*Institute of Geology, CAGS, Beijing*)

Chen Daizhang, Chen Jinlu,
(*China University of Geosciences, Beijing*)

and Yang Kaichun

(*No. 2 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province*)

Abstract

The Caledonian orogenic belt of the Northern Qilian Mountains may be divided into the following eight tectonic units: (1) Tulaishan ophiolite zone, (2) Zhoulangnanshan subduction complex accretionary terrane, (3) Zhoulangnanshan volcanic island arc zone, (4) Zhoulangnanshan north slope back-arc basin, (5) Silurian remnant sea basin, (6) Devonian molasse basins, (7) Post-Devonian superimposed basin, and (8) Jintieshan nappe.

The Zhoulangnanshan Caledonian subductive complex accretionary terrane with the characteristics of plate convergence and complicated constitutions is a high-strain zone composed of poly-volcanic island arcs, fore-arc flysch accretionary wedges, glaucophane schists and ophiolitic mélange zone. Its deformation mechanism is predominantly "simple shear" and the sense of shear is from NE to SW. The metamorphism related to subduction is as follows: the first phase (M_1): low T/low P greenschist-facies metamorphism; the second phase (M_2): low T/high P blueschist-facies metamorphism and the third phase (M_3): retrogressive low T/low P greenschist-facies metamorphism. The high-pressure metamorphism (M_2), which occurred during subduction, underwent medium T/high P metamorphism of the initial stage, cooling/progressive compression of the main stage and heating/decompression of the lag stage. Finally, a "retrotrench" subduction dynamic model characterized by the northward subduction of the central Qilian plate and the southward accretion of the Alxa plate during 450Ma—500Ma is presented in this paper.

Key words: subduction complex accretionary terrane, poly-texture, subduction dynamics of retrotrench