

走滑断裂对超高压变质岩石折返的贡献及青藏高原北部白垩纪隆升之新思考

杨经绥, 李海兵

中国地质科学院 地质研究所 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

YANG Jing-sui, LI Hai-bing

Key Laboratory for Continental Dynamics of MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

YANG Jing-sui, LI Hai-bing. Contributions of strike-slip faulting to exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks and the Cretaceous uplift of the northern Qinghai-Tibet plateau. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4): 080-090

Abstract: Three ultrahigh pressure metamorphic (UHPM) belts, i. e., the north Qaidam, the south Altun, and the high Himalaya UHPM belts, have been discovered in the Qinghai-Tibet plateau, which offer a unique opportunity to investigate the exhumation of deeply subducted UHPM rocks. The north Qaidam UHPM belt is located on the southeastern side of the Altyn Tagh strike slip fault and was formed by the collision between the Qaidam-East Kunlun terrane on the south and the Qilian-Altun micro-terranes and the Alax-Dunhuang terrane on the north. This belt is about 350 km long and consists of eclogite, garnet peridotite and coesite-bearing gneissic rocks. The eclogites formed at between 500 and 440 Ma with a peak UHPM age of 440 Ma. The south Altun UHPM belt is located on the northwestern side of the Altyn Tagh strike slip fault, and contains eclogites and garnet peridotites of ca. 500 Ma. The south Altun belt is believed to be the western extension of the north Qaidam UHPM belt, but now offset for about 400 km by the Altyn Tagh fault. The Altyn Tagh fault is a major sinistral strike slip fault, which extends to depths of greater than 200 km (Wittlinger et al., 1998) and has been active at least since 240-220 Ma (Li Haibing et al., 2001). The Altyn Tagh fault has been recognized as a transpressional fault, and responsible for the uplift of the Qilian mountains and the Altun mountains that border it. We propose that the Altyn Tagh fault is probably responsible for the final exhumation of the UHPM rocks in both north Qaidam and south Altun, a geometric expression perhaps being that the Altyn Tagh fault had a scissor-like kinematic history. The high Himalaya UHPM belt is distributed along the Pakistan and Indian Himalayas, where coesite and diamond have been discovered in eclogites (O'Brien et al., 2001; Sachan et al., 2001; Mukherjee et al., 2005). Coesite-bearing zircons in the eclogite gave a 46 Ma peak UHPM age (Kaneko et al., 2003), suggesting that the UHPM rocks in the high Himalaya formed soon after the closure of the Neo-Tethys ocean and were rapidly exhumed thereafter. The Karakorum dextral strike-slip fault is located NE of the UHPM rocks. Its faulting and associated deformation occurred between 6.88 - 8.75 Ma, with an offset of about 135 km (Zhou Yong et al., 2001). We propose that this fault may have controlled the exhumation and exposure of the UHPM rocks in the high Himalayas. The Tanlu sinistral strike-slip fault in eastern China, which offsets the Dabie and Sulu UHPM belts for about 500 km, may provide another good example for the exhumation of UHPM rock along the two sides of the fault. Based on these three examples, we propose that strike-slip faulting may have played an important role in the exhumation of UHPM

收稿日期: 2006-05-25

基金项目: 中国地质调查局项目 (200413000031, 200313000058); 国家重点基础研究专项 (2001CB711001)

作者简介: 杨经绥 (1950—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石大地构造学。

rocks. The uplift of the Qinghai-Tibet plateau has been attributed to the Cenozoic collision between the India plate and the Eurasia continent. Based on field relationships concerning plateau uplift, volcanic and faulting activities, and basin sedimentation records, we propose that the formation of the plateau occurred in response to two episodes of plate subduction and collision. The first occurred in the Cretaceous due to the closure of the Mid-Tethys Bangong-Nujiang ocean by plate subduction. The northern plateau began to be uplifted at that time because of resistance from the north of the Tarim and North China blocks, and also from the east due to the westward subduction of the Pacific plate under the South China block. The second episode occurred in the Cenozoic as a result of the closure of the Neo-Tethys Yarlung Zangbo ocean, and was responsible for the uplift of the entire plateau. These two episodes may explain why the northern plateau has a higher average elevation (5 000 m) than the southern plateau (4 000 m in average).

Key words: UHP metamorphism; exhumation; strike slip fault; Qinghai-Tibet deformation episodes

摘要: 青藏高原已识别出柴北缘、南阿尔金和高喜马拉雅三条超高压变质带。这些超高压变质带提供了一个不可多得的研究超高压变质岩石形成和折返的机会。柴北缘超高压变质带位于阿尔金断裂的东边,是柴达木—东昆仑地体与祁连—阿尔金微地体和阿拉善—敦煌地体碰撞的产物,由榴辉岩、石榴石橄榄岩和含柯石英片麻岩组成,榴辉岩形成时代 500 ~ 440 Ma,峰期超高压变质年龄 440 Ma。南阿尔金超高压变质带位于阿尔金断裂带的西边,以产出榴辉岩和石榴石橄榄岩为特征,榴辉岩形成时代为 500 Ma。南阿尔金超高压变质带被认为是柴北缘超高压变质带的西延,两者被阿尔金断裂左旋位移约 400 km。阿尔金断裂是巨大的深度 > 200 km 的岩石圈走滑断裂,断裂的活动时代至少早到 240 ~ 220 Ma,认为走滑过程中伴随的隆升作用有可能为柴北缘和南阿尔金超高压变质岩石的折返和出露地表做出了贡献,其中阿尔金断裂起到了类似剪刀型断裂的作用。高喜马拉雅超高压变质带在巴基斯坦和印度被发现,以榴辉岩中含柯石英或金刚石为特征,榴辉岩的超高压变质年龄为 46 Ma,表明超高压变质岩石发生在雅鲁藏布江缝合线关闭后并快速折返。喀喇昆仑断裂走滑过程中伴随的抬升作用则可能对高喜马拉雅地区超高压变质岩石的折返和出露地表做出贡献。在中国东部出露的大别—苏鲁超高压变质带被巨大郯庐断裂左旋走滑位移约 500 km,可以看作是走滑作用伴随的抬升运动对超高压变质岩石的最后折返和出露地表做出重要贡献的又一例证。青藏高原的隆升通常被认为是印度板块和欧亚大陆新生代以来的碰撞结果。根据高原北部断裂的时代、火山活动和沉积盆地的形成,我们提出高原的隆升是两次俯冲碰撞的结果。第一次发生在中特提斯班公湖—怒江洋盆在白垩纪时期的关闭,其时由于北部来自塔里木盆地和北中国板块及东部来自太平洋板块俯冲产生的抵柱效应,高原北部开始隆升;第二次发生在印度板块的新生代俯冲碰撞作用,造成高原的整体抬升,由此可以解释高原北部平均海拔 (5 000 m) 要高于高原南部 (平均海拔 4 000 m)。

关键词: 超高压变质作用;折返作用;走滑断裂;隆升作用;青藏高原

中图分类号: P54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005 - 2321 (2006) 04 - 0080 - 11

0 引言

青藏高原双倍的厚地壳和平均海拔 5 000 m 高地形被普遍认为是印度板块与欧亚板块碰撞产生的最重要结果,青藏高原的物质组成、碰撞变形与隆升过程的研究也成为国际学术界竞相探索的前沿热点问题。研究青藏高原的时间越长,思考的问题也就越多。近些年一直围绕青藏高原做研究,觉得有几个新问题和新思考,需要与大家讨论。

板块深俯冲作用形成超高压变质岩石是近 20 年来全球研究的热点,其中表壳岩能够俯冲到 > 100

km 深部再折返到地表的机理是一个令人困惑的难题。全球目前被确认的超高压变质带已有 20 条^[1],而仅在青藏高原就出露有柴北缘、南阿尔金和高喜马拉雅三条超高压变质带^[2-4]。因此有了本文走滑断裂对超高压变质岩石折返的贡献之考虑。青藏高原由印度板块与欧亚大陆碰撞而隆升成高原,几乎已成一公理,但阿尔金断裂印支期走滑作用及祁连山白垩纪抬升作用的发现^[5-7],使人产生了青藏高原北部的白垩纪隆升及其幅度之新思考。本文提出的走滑断裂对超高压变质岩石折返的贡献是一个新想法,而关于青藏高原北部地区白垩纪的隆升的思考则是与当前主流的声音唱反调的,旨在抛砖引玉。

1 超高压变质岩石在青藏高原和造山带中广泛存在

造山带中超高压变质岩石的形成和折返是当前全球大陆动力学研究的一个热点。中国中央造山带的中部秦岭和东部大别和苏鲁已被确认存在三条超高压变质带^[8-10]。值得注意的是,青藏高原内近年来已陆续发现三条超高压变质带,分别是(1)柴北缘超高压变质带,(2)南阿尔金超高压变质带和(3)高喜马拉雅超高压变质带(图1)。因此,青藏高原除提供研究巨厚高原的形成机理和动力学过程之外,同样提供了研究超高压变质岩石形成和折返机理的得天独厚之条件。除了青藏高原出露的三条超高压变质带,本文也将大别苏鲁超高压变质带列入讨论,认为它们的产出特征同样可以与其对比。

1.1 柴北缘超高压变质带

位于青藏高原北缘的祁连—阿尔金加里东造山带是在加里东期阿拉善—敦煌地体、祁连—阿尔金微地体和柴达木—东昆仑地体汇聚及碰撞的产物。三个地体之间存在相隔300 km的北祁连—北阿尔金俯冲碰撞杂岩带及柴北缘—南阿尔金俯冲碰撞杂岩带。近年来,在祁连南缘识别出一条长350 km的榴辉岩和石榴石橄榄岩为特征的超高压带(大柴旦鱼卡—锡铁山—都兰北),并且在柴北缘都兰地区首次发现超高压变质作用的典型标志矿物柯石英,确定超高压变质作用的存在。通过已有的U-Pb锆石、SHRIMP、Sm-Nd等时线等同位素年代学测定,确定了榴辉岩形成的时代(495~440 Ma)及不同的原岩时代(800~700 Ma;1 000 Ma),正片麻岩的变质时代(470 Ma左右)和原岩时代(1 000~900 Ma)。含柯石英锆石的U-Pb原位定年(SIMS)获得该样品的超高压准确定年(440±16) Ma^[11-17]。

根据已有的年代学和地球化学资料,对柴北缘超高压变质带的形成演化提出构造模式:早古生代时期祁连南、北边缘有新洋盆形成,海洋岩石圈的俯冲造成洋盆的闭合,形成了柴北缘大约500 Ma时期的滩洞山群岛弧火山岩和有关的花岗岩带,俯冲继续导致陆-陆碰撞和大陆地壳的深俯冲,原已构造侵位到陆壳的古洋壳(800~750 Ma)与地表其他岩石,包括早期(~1 000 Ma)存在的基性岩类,在500 Ma左右开始俯冲到地下深处,形成不同成分的榴辉岩等超高压变质岩石^[13]。超高压变质岩石的形

成时限为500~440 Ma,折返开始年龄为470~460 Ma,完成时间为406~400 Ma^[14-15]。

1.2 南阿尔金超高压变质带

阿尔金山的西南段榴辉岩发现较早^[18],榴辉岩的形成温压条件为 $t=850$, $p=3$ GPa,变质峰期年龄为500~504 Ma左右^[19-20]。最近在阿尔金榴辉岩的锆石中发现柯石英假象,并在榴辉岩中的绿辉石和磷灰石中发现特征的出熔结构,为阿尔金榴辉岩中超高压变质作用的存在提供了进一步证据^[4]。校培喜等(2001)和刘良等(2002)对茫崖以西的巴什瓦克地区石榴橄榄岩的研究中也找到了超高压变质作用的新证据,并且认为在南阿尔金存在近EW走向的UHP变质带,其总体走向与NEE向的阿尔金主断层成一定的交角,向东明显被阿尔金走滑断裂所切割。但由于阿尔金地区自然条件限制,研究程度还不够,目前还不能确定UHP岩石的分布范围^[21-22]。

1.3 高喜马拉雅超高压变质带

印度板块向北俯冲到西藏板块之下造成青藏高原的抬升,在两者之间的碰撞带表现为印恒盆地(Gange basin)的下插和喜马拉雅山的隆升。喜马拉雅山前的陆内俯冲归因于印度板块向北的持续运动。值得注意的是,在喜马拉雅山前最近已陆续在巴基斯坦境内、印度境内找到超高压变质岩石,发现了典型的超高压矿物柯石英和金刚石^[2,23-24],并且在同一带中的中国境内找到榴辉岩^[25]。巴基斯坦的榴辉岩形成时代为40~50 Ma^[26-27],含柯石英锆石定年为46 Ma^[28]。值得注意的是,雅鲁藏布蛇绿岩形成时代为139 Ma^[29],或120~110 Ma,及洋盆关闭的时代为40 Ma^[30]或65 Ma(万晓樵,2001)。由此看来,在洋盆关闭前或期间,在喜马拉雅山前已形成陆内俯冲,开始形成高压超高压变质岩石。

1.4 大别—苏鲁超高压变质带

自许志琴在大别山岳西蓴蒲榴辉岩中首先发现典型超高压变质矿物柯石英^[31],并在1988北京怀柔召开的国际构造会议上予以报道以来,大别苏鲁超高压变质岩成为全球研究超高压变质作用的热点。除在不同地点、不同类型岩石中发现超高压典型矿物柯石英外,还在该带的不同地点又相继发现金刚石等典型超高压矿物^[32-35]。认为大别高压-超高压变质带的峰期变质作用发生在240~220 Ma,属印支期扬子板块与华北板块陆-陆俯冲碰撞的产物^[9,36-39]。

中国大陆科学钻探先导孔 (PP2) 的 SHRIMP U-Pb 年代学研究, 获得副片麻岩含柯石英锆石微区年龄为 234 ~ 220 Ma; 正片麻岩样品的含柯石英锆石微区年龄为 242 ~ 224 Ma^[40]; 苏鲁超镁铁岩中含柯石英锆石准确定年为 221 Ma, 并在苏鲁榴辉岩中发现早古生代 (440 Ma) 超高压变质作用证据^[14]。Zhang 等报道威海地区的榴辉岩形成压力高达 3 ~ 3.5 GPa^[41], 对荣城超高压大理岩和其中的榴辉岩研究也表明该地区的超高压变质岩形成压力达 2.5 ~ 3.5 GPa^[42]。这些研究表明, 苏鲁地区高压超高压变质带的空间分布、产出特征、岩石类型、形成条件等方面几乎都可以与大别超高压带对比^[43-44]。多数地质学家认为大别-苏鲁为同一条超高压变质带, 被郯庐断裂所断开, 并左旋位移约 500 km^[10, 45]。

2 走滑断裂对超高压变质带的折返与剥露的贡献

2.1 阿尔金走滑断裂对柴北缘—南阿尔金超高压变质带的控制

阿尔金走滑断裂是一条规模巨大的左旋走滑断裂, 而柴北缘超高压变质带和南阿尔金超高压变质带分别出露在靠近阿尔金断裂带的两侧, 远离阿尔金断裂带, 未见超高压变质岩出露。对阿尔金地区榴辉岩、蛇绿岩、高压变质泥质岩、石榴石橄榄岩的研究, 特别是对南阿尔金榴辉岩带的地质背景、岩石类型、矿物组合、岩石地球化学及峰期变质时代的研究^[18-22, 46-47], 表明两边的地质构造单元, 如北部的敦煌地体、北阿金俯冲碰撞带、阿尔金微地体及南阿尔金俯冲-碰撞带可以分别与祁连山的阿拉善板块、北祁连俯冲碰撞带、祁连微板块及柴北缘俯冲碰撞带相对比, 认为阿尔金山是祁连造山带的西延部分; 同样, 南阿尔金超高压变质带的形成温压条件、时代及围岩地层均可与柴北缘超高压变质带对比, 因此两者被认为曾是一条超高压变质带, 被阿尔金巨型走滑断裂水平错开近 400 km^[20, 48-50]。

因此, 一个十分有意义的问题是: 阿尔金断裂何时形成及其对超高压变质岩带的出露究竟有何贡献?

前人较普遍认为, 阿尔金断裂是新生代以来的大型左行走滑断裂, 是青藏高原隆起并向北推挤的一条重要应力释放线^[51-54]。然而, 近期的研究表明,

阿尔金断裂带中存在印支期的糜棱岩 (220 ~ 240 Ma)^[6] 和沿断裂发育白垩纪的火山活动^[7], 以及白垩纪形成的陆相盆地^[55]。阿尔金断裂带中的糜棱岩和火山岩研究表明, 阿尔金断裂带具有多期活动特征, 其强烈活动期为 (1) 240 ~ 220 Ma 开始形成, 至 190 Ma 仍在活动; (2) 112 ~ 106 Ma; (3) 83 ~ 91 Ma; (4) 60 ~ 44 Ma; (5) 渐新世至中新世; (6) 上新世至更新世^[5]。

尤其, 阿尔金断裂带走滑速率的研究, 揭示出高原北部山脉的形成与阿尔金断裂带的走滑作用具有成因关系。研究发现, 沿整个阿尔金断裂带出现走滑速率突然变小的几个特定地区, 而这一特定地区均为阿尔金断裂与分枝逆冲断裂相交的拐点地区, 也就是阿尔金断裂与山脉的交汇处。这表明阿尔金断裂带走滑过程中一部分能量转化为分支的逆冲断裂, 逆冲作用使得前新生代地质体抬升成山。从北东往南西方向, 这些山脉主要为祁连山、党河南山、祁漫塔格山、西昆仑山。阿尔金断裂经过这些地段时, 其走滑速率都有一个明显的突变, 并且这些山的特点均为西高东低, 即靠近断裂带高, 远离则山势变缓, 这一特点说明这些山脉的形成与阿尔金断裂带的走滑作用具有成因关系。

与此相一致的是超高压变质岩石的出露也是分布在靠近断裂的两侧, 表现为南阿尔金超高压变质岩石几乎沿断裂分布, 柴北缘超高压变质岩石则随着山势的降低在东部没有出露。没有出露的原因有可能是山脉隆升的差异所致, 而原本没有形成超高压变质岩石的可能性较小, 因为超高压变质带的形成和出露通常受板块边界控制, 而中央造山带中的早古生代板块边界的规模可达数千 km^[8, 12], 因此超高压变质带形成时的规模可能要较目前出露的数百 km 范围大得多。由于走滑断裂两侧均出露来自深部的超高压变质岩石, 我们认为, 除了由于走滑挤压作用造成垂直抬升外, 阿尔金断裂有可能类似于一条剪刀型走滑断裂, 并由于断裂两侧存在岩石圈规模的滑脱面, 使得断裂两侧的走滑前端向上抬起 (图 2)。

我们的结论是, 由于走滑断裂可以产生垂直运动, 将深部的东西抬升到浅层或直接出露地表的可能性是存在的。这里新的问题是, 超高压变质岩石通常会折返到什么程度? 而走滑断裂对其能够出露地表究竟有多大贡献? 这是一个今后需要深入研究的问题。

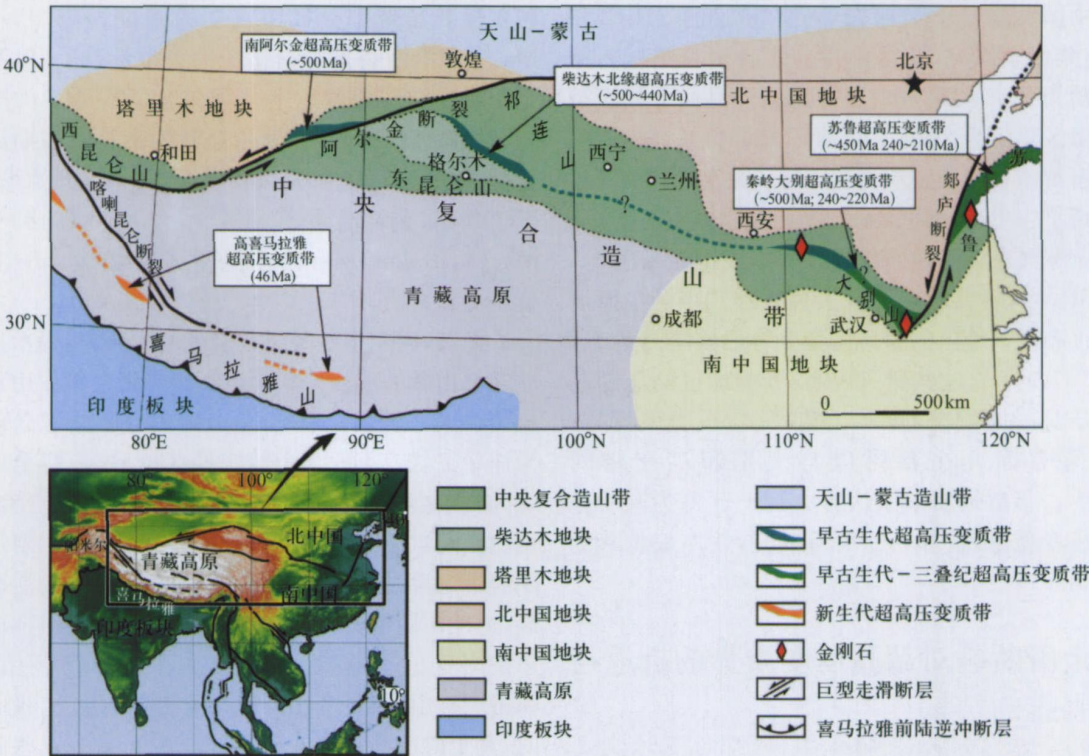


图 1 青藏高原的超高压变质带和大别苏鲁超高压变质带分布图
Fig. 1 Distribution of the ultrahigh-pressure metamorphic belts on the Tibetan plateau and in eastern China

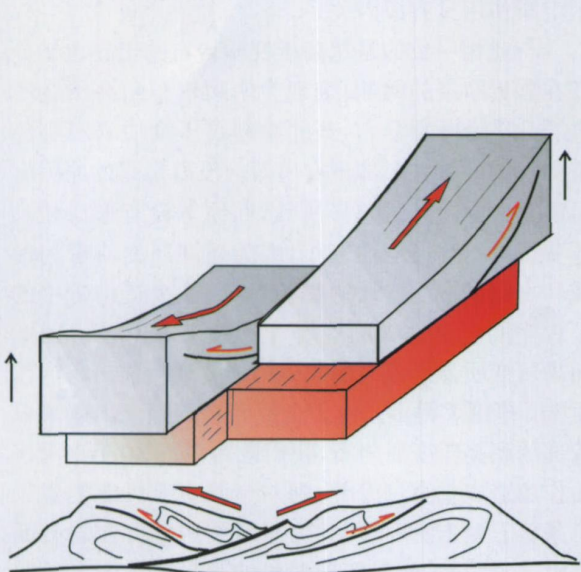


图 2 走滑断裂对超高压变质岩石折返和抬升贡献的示意图
Fig. 2 A cartoon showing the contribution of a strike-slip fault to exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks

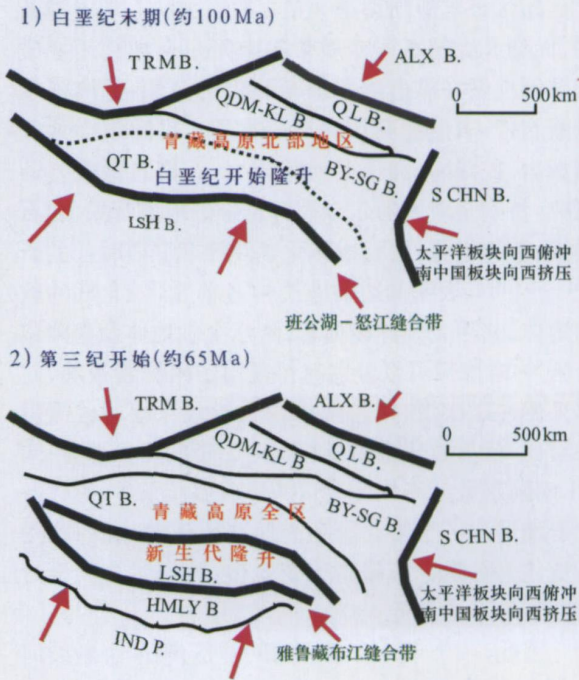


图 3 青藏高原两次板块作用和两次隆升作用的示意图
Fig. 3 A diagram showing that uplift of the Tibetan plateau was related to two times of plate subduction, one occurred in Cretaceous and caused the uplift of the northern Tibetan plateau, i. e., the region north to the Bangong-Nujiang suture, and the second in Cenozoic and caused the uplift of the whole Tibetan plateau

2.2 喀喇昆仑走滑断裂对高喜马拉雅超高压变质带折返和出露的控制

高喜马拉雅山的超高压变质岩形成在 50 ~ 40 Ma, 现在却已出露地表, 是令人十分惊奇的一件事, 无疑给研究超高压变质岩的形成和折返机制提供了一个极好的窗口。

走滑过程中伴随隆升运动是高原北部大型走滑断裂带中普遍存在的现象。我们已经注意到, 在高喜马拉雅超高压变质岩石出露的附近, 其北东方向是喀喇昆仑断裂。该断裂是高原内部一条巨大的走滑断裂系, 与阿尔金断裂一样, 也是协调印度板块与欧亚板块之间能量和物质迁移的构造线。在喀喇昆仑断裂带中花岗岩糜棱岩较为发育, 拉伸线理近水平, 所有的旋转应变表现为右行走滑, 并具有右行转换挤压作用的特征。脆性的走滑断裂带位于韧性走滑断裂带的北东侧, 表现出冲沟、冲积扇以及河流阶地的右行错断。山体的边缘出现一系列向北东陡倾的正断裂, 普遍带有不同程度的走滑分量, 并在喀喇昆仑断裂的西南侧具有近平行于走滑断裂的逆冲断裂。这种走滑、逆冲、伸展的关系, 反映出喀喇昆仑断裂带走滑变形过程中伴随强烈的隆升作用^[56]。同位素定年测得喀喇昆仑断裂强烈走滑变形发生在 6.88 ~ 8.75 Ma 期间, 从木孜塔格达山至木吉一带, 喀喇昆仑断裂的总位移量为 135 km 左右^[57]。喀喇昆仑断裂走滑过程中伴随的隆升作用及出露的超高压变质岩石的空间展布表明, 该巨型走滑断裂同样可能控制了高喜马拉雅超高压变质岩石的折返和出露。

与阿尔金断裂不同的是, 喀喇昆仑走滑断裂与超高压变质带的分布几乎是平行的, 而超高压变质岩石出露在其一侧。因此, 虽然两者总的俯冲碰撞和走滑断裂形成的机理是可对比的, 但从与超高压变质带的分布形式看, 可以将其分为两种不同的产出类型。另一方面, 同样存在的问题是, 如何将走滑作用的贡献与俯冲折返的贡献相区分。

2.3 郯庐走滑断裂对大别苏鲁超高压变质带折返和出露的控制

无独有偶, 与西部的阿尔金走滑断裂相呼应, 在中央造山带的东段也存在一条巨大的左旋走滑断裂带, 即郯庐断裂。并且大别—苏鲁超高压变质带分布于其两侧, 远离断裂带的两侧, 无论是在南秦岭或朝鲜半岛, 都没有发现同一带的超高压变质岩石。如前所述, 前人均认为, 大别—苏鲁为同一条超高压

变质带, 被郯庐断裂所断开, 并左旋位移约 500 km。类似阿尔金断裂同样的问题, 郯庐断裂究竟何时形成? 郯庐断裂的活动对超高压变质岩带的出露究竟有何贡献?

前人关于郯庐断裂带的大规模平移时间主要存在三种认识, 即前印支期、印支期和燕山期。大型左行走滑构造的产生可能与斜向俯冲碰撞有关, 认为郯庐断裂的走滑产生可能有扬子板块向北的深俯冲及与中国北方板块碰撞的贡献。新的横跨合肥盆地及郯庐断裂的地震剖面发现, 郯庐断裂带的老地层逆冲在西侧合肥盆地的中、下侏罗统之上, 并切断中、下侏罗统, 说明在中侏罗世之后发生的走滑活动时间为 150 ~ 135 Ma^[58]。

但郯庐断裂与阿尔金断裂也存在不同之处。首先, 郯庐断裂不仅经历过左旋剪切, 并且具有裂谷性质。研究认为, 在晚白垩世, 由于太平洋板块俯冲方向发生了改变 (由自东向西方向的俯冲转为自南东向北西方向的俯冲), 来自东面的压力消失, 板块的消减作用变慢, 使得华北地块的地壳处于相对松弛的状态, 区域应力场由原来的压扭应力改变为张应力, 从而使郯庐断裂具有裂谷性质^[59]。另一个不同之处是阿尔金断裂受喜马拉雅运动的影响很大, 新生代的隆升运动十分明显, 但郯庐断裂产生的隆升运动及受太平洋板块的作用到底有多大, 并不十分清楚。因此, 谈到走滑断裂对超高压变质带折返和出露地表的贡献, 两者应该存在差别, 这是又一个新的问题。

3 青藏高原北部白垩纪的隆升作用和两阶段隆升模式的提出

前面谈到阿尔金走滑断裂在白垩纪有过较强烈的活动, 主要表现为 (1) 分别在阿尔金断裂和祁连山北缘逆冲断裂交会处识别出两期岩浆活动, 100 ~ 120 Ma 左右的粗玄质熔岩喷发和 82 Ma 左右的粗面质岩脉和熔岩的活动, 两期岩浆活动与阿尔金断裂带的活动存在空间上和时间上的相关性; (2) 沿阿尔金断裂伴随走滑作用产生十分强烈的隆升作用, 使得中、下地壳甚至更深的岩石抬升剥露, 造成了沿阿尔金断裂带两侧分布着由大小不同的古老块体组成的山体, 这些山体或褶皱带的走向与阿尔金断裂带呈一定的角度过渡关系, 表明走滑作用对这些山体形成和运动特征的控制; (3) 在山前、山间盆地的

沉积过程中也反映该时期隆升作用的存在,例如,在祁连山西段北部山前白垩纪地层中,发现大量的软沉积变形,研究表明此时祁连山西段已开始抬升。昌马盆地(山间盆地)中白垩纪巨厚的紫红色砾岩、砂砾岩地层不整合盖在前白垩纪地层之上;祁连山山前盆地——酒西盆地(西部)分布一套类似的白垩纪紫红色砾岩层,它们由下往上,由粗逐渐变细,为似磨拉石沉积,其白垩纪不整合为最早的、主要的不整合。

问题是:阿尔金断裂为什么会在白垩纪出现强烈活动?动力来自何处?

人们通常可能已习惯于认为青藏高原是印度板块 55 Ma 以来的俯冲碰撞所形成^[52]。我们这里提出的不同观点是:在印度板块造成青藏高原激烈抬升之前,班公湖-怒江以北的高原北部地区在白垩纪已经抬升一定高度,产生大量剥蚀和巨厚沉积,而此时高原南部地区仍然是低地形,甚至在海平面以下。因此,当我们考虑青藏高原的隆升问题及高原北部许多高山大川的形成时,以及高原北部比高原南部的平均海拔还要高时,我们不得不考虑高原北部在印度板块碰撞之前的状态,即班公湖-怒江蛇绿岩洋壳所代表的中特提斯洋在白垩纪关闭时的俯冲作用对北部地区地形地貌或“隆升”所作的贡献。之所以“隆升”用了引号,是强调对这个问题有待于讨论,并没有定论。下面我们用一个卡通,来注释青藏高原北部白垩纪开始隆升及高原存在两阶段隆升的新看法。

3.1 中特提斯班公湖—怒江洋盆的关闭造成高原北部的隆升

前人通常将昆南阿尼玛卿蛇绿岩代表古特提斯洋的关闭,班公湖—怒江蛇绿岩代表中特提斯洋的关闭,雅鲁藏布江蛇绿岩代表新特提斯洋的关闭^[29,60-62]。古特提斯洋的展布主要为东西向,横贯昆仑,西出中国边境,东连秦岭,但在龙门山有一南北向分叉,表现为巴颜喀拉群巨厚的海相沉积大三角区。古特提斯阿尼玛卿洋在印支期的关闭,使得羌塘-巴颜喀拉地块与北部的祁连山—阿尔金山—昆仑地块拼合在一体,形成统一大陆,该边界被认为代表冈瓦那大陆的北部界线^[61,63]。由于该大洋的关闭过程中发生的斜俯冲作用,产生了阿尔金断裂和昆南断裂的走滑作用^[6,64]。

班公湖—怒江缝合带代表中特提斯洋在白垩纪早期的关闭,来自冈瓦那大陆的冈底斯微陆块沿班

公湖—怒江一线俯冲到劳亚大陆之下。该缝合带长达数千 km,沿其走向蛇绿岩、岛弧火山岩均较发育,因此被认为是又一次巨大的板块俯冲、碰撞的产物,板块会聚的方向主要为 SW-NE 向^[29]。在同一时期,班公湖—怒江以北的地区还受到东部的挤压应力,这种应力很可能来自太平洋板块向西的俯冲,造成了北部物质无法东流,而隆升成山脉或高地,即高原雏形的形成。由于两个方向应力大小存在差异,又会造成地体和盆地的旋转。反推之,高原北部白垩纪盆地形成时表现出的旋转应变,恰恰说明当时不仅存在 S-N 向挤压,同时在昌马盆地的以东地区还存在 E-W 向挤压。龙门山白垩纪存在由东向西的俯冲及龙门山褶皱带的隆起,表现为一系列逆冲断裂的形成及同时代的与俯冲有关的大量白垩纪的花岗岩的侵位与存在两个方向的挤压相一致。

我们注意到不仅在祁连地区白垩纪盆地比比皆是,在班公湖-怒江以北的高原北部地区在白垩纪时已均抬升为陆相,在一些盆地中形成白垩纪巨厚粗碎屑沉积。这些成果均反映在最近完成的青藏高原 1:25 万比例尺图幅中,不具体一一列举和详细讨论。显然,区域上的普遍抬升和巨厚沉积盆地的出现,与走滑断裂的局部活动造成的山间盆地是不同的。它们的形成,包括阿尔金断裂白垩纪时期的强烈活动,与中特提斯班公湖-怒江洋盆关闭的时间一致的。青藏高原北部白垩纪大量陆相沉积盆地的形成和山脉的隆升,说明白垩纪时高原雏形在班公湖—怒江北部广大地区已开始形成。

3.2 新特提斯雅鲁藏布洋盆的关闭造成高原的整体隆升

新特提斯雅鲁藏布洋盆的关闭发生在 40 Ma^[30]或 65 Ma^[65],代表印度板块与欧亚大陆的最后闭合。之后印度板块的持续俯冲,造成了喜马拉雅山的快速抬升和高原整体的隆升,形成现今的高原面貌,这已是没有什么争议的事实。需强调的还有两点事实:(1)大面积的白垩纪海相地层出露在雅鲁藏布江以北至班公湖—怒江缝合线以南地区,而在班公湖—怒江以北地区则仅仅有少量白垩纪陆相盆地沉积^[66];(2)雅鲁藏布江以北地区平均海拔高度(4 000 m)低于班公湖-怒江以北地区(平均海拔 5 000 m)。这两点,有可能从宏观上提供了北部地区的隆升时间要早,造成平均较高的累积隆升高度的证据。因此认为,在建立高原隆升模型以及计算高原北部的隆升速率时,应该考虑如何识别高原北

部白垩纪时期的隆升及其对建立高原隆升模型和计算高原北部隆升速率时的贡献。

总之,如本文前言中谈到,李海兵等(2001)^[5]对阿尔金走滑断裂印支期活动时代的确定,不仅仅是对该断裂本身形成时代和成因研究方面的一个重大突破,并使得我们对高原北部的许多地质现象的解释打开了思路,包括对一系列大规模走滑断裂和巨大的山链以及伴随的火山岩浆活动的认识,也包括前面讨论的超高压变质岩石的折返和剥露,以及本节讨论的祁连山等山脉和班公湖—怒江缝合线之北的高原北部白垩纪隆升等问题,使得我们的思路不再囿于高原的隆升仅仅由于印度板块的一次简单的俯冲碰撞造成,而得出青藏高原的隆升历经两次板块的俯冲碰撞作用的认识,即,中特提斯班公湖—怒江洋盆在白垩纪的关闭造成高原北部初始隆升,新生代 65 Ma 以来印度板块俯冲造成新特提斯雅鲁藏布洋盆的关闭以及发生在喜马拉雅山前的陆陆碰撞使得高原在新近纪后开始快速抬升。

与 Louie Liou、Gary Ernst、Rainer Altherr 等教授开展了有收获的讨论,陈松永协助图件和准备参考文献,在此表示感谢。

References :

- [1] CHOPIN C. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 212: 1-14.
- [2] O'BRIEN P J, ZOTV N, LAW R, et al. Coesite in Himalaya—an eclogite and implications for models of India-Asia collision [J]. Geology, 2001, 29: 435-438.
- [3] YANG Jingsui, SONG Shuguang, XU Zhiqin, et al. Discovery of coesite in the north Qaidam early Paleozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (2) : 175-179(in Chinese).
- [4] ZHANG Jianxin, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Ultrahigh-pressure metamorphic evidence in the Altun eclogite[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(3) : 231-234 (in Chinese).
- [5] LI Haibing, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Geological and geochronological evidence for the Triassic strike slip movement of the Altyn Tagh fault[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (16) : 1333-1338(in Chinese).
- [6] LI Haibing, YANG Jingsui. Evidence for Cretaceous uplift of the northern Qinghai-Tibetan plateau [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4) : 345-359(in Chinese).
- [7] YANG Jingsui, MENG Fancong, ZHANG Jianxin, et al. The shoshonitic volcanic rocks at Hongliuxia: pulses of the Altyn Tagh fault in Cretaceous [J]. Science in China: Series D, 2001, 41 (Suppl) : 94-102.
- [8] YANG Jingsui, XU Zhiqin, PEI Xianzhi, et al. Discovery of metamorphic diamonds in Qinling: new evidence of the huge ultrahigh-pressure metamorphic belt across the central China and the recognition of both Paleozoic and Mesozoic deep subduction[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(1) : 184-195 (in Chinese).
- [9] LI S, CHEN Y, CONGB, et al. Collision of the north China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes [J]. Chemical Geology, 1993, 109: 70-89.
- [10] YANG Jianjun. Eclogite, pyroxenite, and related ultramafic rocks in Shandong and north Jiangsu provinces, East China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 26-52 (in Chinese).
- [11] YANG Jingsui, XU Zhiqin, LI Haibing, et al. Discovery of eclogite at the northern margin of Qaidam basin, NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43: 1755-1760 (in Chinese).
- [12] YANG Jingsui, XU Zhiqin, SONG Shuguang, et al. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai province and its significance for the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74: 156-168 (in Chinese).
- [13] YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, MENG Fancong, et al. Ultrahigh pressure eclogites of the north Qaidam and Altun mountains, NW China and their protoliths [J]. Earth Science Frontier, 2003, 10 (3) : 291-314 (in Chinese).
- [14] YANG Jingsui, LIU Fulai, WU Cailai, et al. Two ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4) : 463-477(in Chinese).
- [15] ZHANG Jianxin, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, northwestern China: evidences from U-Pb and Ar-Ar dates [J]. Geochimica, 2000, 29(3) : 217-222 (in Chinese).
- [16] ZHANG Jianxin, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Two contrasting eclogites on the northern margin of Qaidam basin, western China [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3) : 331-338.
- [17] SONG Shuguang, YANG Jingsui. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites: evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, NW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2) : 180-185 (in Chinese).
- [18] LIU Liang, CHE Zicheng, LUO Jinhai. Identification of eclogites in the west section of the Altyn Tagh fault and their geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41 (14) : 1485-1488 (in Chinese).

- [19] ZHANG Jianxin, ZHANG Zeming, XU Zhiqin, et al. The ages of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt—the evidence for existence of Caledonian orogenic root [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (24) : 2256-2259.
- [20] ZHANG Jianxin, ZHANG Zeming, XU Zhiqin, et al. Petrology and geochronology of eclogites from west segment of the Altyn Tagh, northwestern China [J]. Lithos, 2001, 56:187-206.
- [21] XIAO Peixi, WANG Yonghe, ZHANG Hanwen, et al. Discovery of magnesite-bearing garnet lherzolite in the Altun high-ultra high pressure metamorphic belt and its geological significance [J]. Northwestern Geology, 2001, 34 (4) : 67-74 (in Chinese).
- [22] LIU Liang, SUN Yong, XIAO Peixi, et al. Discovery of ultrahigh-pressure (3.8 GPa) garnet lherzolite in the Altun region [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (9) : 657-662 (in Chinese).
- [23] SACHAN H, MUCHERJEE B K, ISHIDA H, et al. New discovery of coesite from the Indian Himalaya [M]. Fluid-slab-mantle interactions and ultrahigh-*p* minerals: UHPM Workshop 2001, Waseda University, Japan. 2001:124-128.
- [24] MUKHERJEE B, SACHAN H, AHMAD T. A new occurrence of microdiamond from Indus suture zone, Himalaya [M]. Possible origin, 20th Himalayan Karakoram Tibet Workshop, 29 March-2 April, 2005, Aussios, France.
- [25] LAMARDO B, ROLFO F. Two contrasting eclogite types in the Himalaya: implications for the Himalayan orogeny [J]. Journal of Geodynamics, 2000, 30: 37-60.
- [26] TONARINI S, VILLA I, OBERLI M, et al. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalaya: implication for India-Eurasia collision [J]. Terra Nova, 1993, 5: 13-20.
- [27] SPENCER D A, GEBAUER D. SHRIMP evidence for Permian protolith age and a 44 Ma age for the Himalayan eclogites (Upper Kaghan, Pakistan): implications for the subduction of Tethys and the subdivision terminology of the NW Himalaya [C]. Himalaya-Karakoram Tibet Workshop. 11th Flagstaff Arizona USA, 1996: 147-150.
- [28] KANEKO Y, KATAYAMA I, YAMAMOTO H, et al. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21: 589-599.
- [29] WANG Xibin, BAO Peisheng, DENG Wanming, et al. Tectonic evolution of the lithosphere of the Himalayas, Xizhang (Tibet) ophiolite [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:1-328 (in Chinese).
- [30] PEARCE J A, DENG Wanming. The ophiolites of the Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986) [M]. CHANG C, et al. The geological evolution of Tibet. The Royal London Society, 1988: 215-238.
- [31] XU Zhiqin. Etude tectonique et microtectonique de la chaîne paléozoïque et triasique des Qinling (Chine) [D]. Académie de Montpellier University des Sciences et Techniques du Languedoc. (unpublished PhD thesis) 1987: 96-98.
- [32] XU Shutong, OKAYA I. Diamonds from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting [J]. Science, 1992, 256: 80-82.
- [33] LU Yongzeng. Some ultra-high pressure metamorphic features of ultrabasic rocks in northern Jiangsu [J]. Jiangsu Geology, 1998, 22 (1) : 1-9 (in Chinese).
- [34] YANG Jingsui, XU Zhiqin, BAI Wenji, et al. Discovery of the diamond in eclogite in Sulu area [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (1) : 69 (in Chinese).
- [35] XU Shutong, LIU Tican, CHEN Guanbao, et al. New discovery of the diamond in the eclogite in Sulu-Dabie area [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (10) : 1069-1075 (in Chinese).
- [36] AMES L, TITTON G R, ZHOU G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites [J]. Geology, 1993, 21: 339-342.
- [37] CHAVAGNAC V, JAHN B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics, and tectonic implications [J]. Chemical Geology, 1996, 133: 29-51.
- [38] CONGB L. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie Shan-Sulu region of China [M]. Beijing: Science Press, 1996: 1-224.
- [39] HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 161: 215-231.
- [40] LIU Fulai. Special mineral inclusions preserved in zircons from gneisses in Maobei area of southern Sulu terrane: indicating the possible deep-subduction of gneisses to depths greater than 120 km [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19 (3) : 479-489 (in Chinese).
- [41] ZHANG R Y, HIRAJIMA T, BANNON S, et al. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China [J]. Metamorphic Geology, 1995, 13: 659-675.
- [42] KATO T, ENAMI M, ZHAI M. Ultra high pressure marble and eclogite in the Su-Lu UHP terrane, eastern China [J]. Chem Geol, 1997, 127: 61-79.
- [43] MARUYAMA S, TABATA H, NUTMAN A B, et al. SHRIMP U-Pb Geochronology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks of the Dabie mountains [J]. Central China, Continental Dynamics, 1998, 3: 72-87.
- [44] JAHN B M. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites of the Dabie orogen: implications for continental subduction and collisional tectonics [M]. HACKER B, LIOU J G. When continents collide: geodynamics and geochemistry

- of ultrahigh pressure rocks. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishing, 1998: 203-240.
- [45] OKAY A L, XU Shutong, SENGOR A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China[J]. European Journal of Mineralogy, 1989(1): 595-598.
- [46] CHE Zicheng, LIU Liang, LIU Hongfu, et al. Discovery and occurrence of high-pressure matapelitic rocks from Altun mountain areas, Xinjiang Autonomous Region [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (23): 1988-1991.
- [47] ZHANG Jianxin, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. The ultra-high pressure metamorphism evidence of the eclogites in Altun [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (3): 231-234 (in Chinese).
- [48] XU Zhiqin, YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73 (3): 193-205 (in Chinese).
- [49] GE Xiaohong, LIU Junlai. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic Belt [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (4): 223-230 (in Chinese).
- [50] YANG Jingsui, XU Zhiqin, ZHANG Jianxin, et al. Tectonic significance of early Paleozoic high-pressure rocks in Altun-Qaidam-Qilian Mountains, northwest China [M] HENDRIX M S, DAVIS G A. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central Asia: from continental assembly to intra-continental deformation. Boulder, Geological Society of America Memoir, 2001, 194: 151-170.
- [51] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Active tectonics of Tibet [J]. J Geophys Res, 1978, 83: 5361-5375.
- [52] TAPPONNIER P, MOLNAR P. Active faulting and tectonics in China [J]. J Geophys Res, 1977, 82: 2905-2930.
- [53] TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMJO R. On the mechanics of the collision between India and Asia [M] COWARD M P, RIES A C. Collision Tectonics. London: Geological Society of London Special Publish, 1986: 115-157.
- [54] AVOUAC J P, TAPPONNIER P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. Geophys Res Lett, 1993, 20: 895-898.
- [55] ARNAUD N, TAPPONNIER P, ROGER F, et al. Evidence for Mesozoic shear along the western Kunlun and Altyn-Tagh fault, northern Tibet (China) [J]. J Geophys Res, 2003, 108, B1, ETG 12-1—12-27.
- [56] LI Haibing, FRANK V, XU Zhiqin, et al. Deformation and tectonic evolution of the karakorum fault, western Tibet [J]. Geology in China, 2006, 33(2): 239-255 (in Chinese).
- [57] ZHOU Yong, XU R H, YAN Y H, et al. Dating of the Karakorum strike-slip fault [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (1): 10-18.
- [58] ZHANG Jiaodong, SONG Guoqi, LIU Zhongliang. The time of the sinistral strike slip of the Tanlu fault determined by seismic data [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (4): 582 (in Chinese).
- [59] CHANG Xiaotao, HU Jianguo. The Tanlu fault and the combination of the North China and Yangtze terranes [R]. (Unpublished data).
- [60] YANG Jingsui, CHAI Y, FENG B. Plume-type mid-ocean ridge basalt in the Bangong lake ophiolite: geochemistry evidence [M] LI G, ZHOU W, NICOLAS A. Geology of Himalayas—papers on geology. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 477-491.
- [61] YANG Jingsui, ROBINSON P T, JIANG Chunfa, et al. Ophiolites of the Kunlun mountains, China and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1996, 258: 215-231.
- [62] YANG Jingsui, ZHENG Xinghua, BAI Wenji, et al. A preliminary study on genesis of the Dur'ngoi massive Cu-Co-Zn sulfide deposit hosted by the peridotite of A'nyemaqen ophiolite, Kunlun Mt., China [C]. Proc. 30th IGC. 1997, 9: 381-392.
- [63] YANG Jingsui, WANG Xibin, SHI Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust [J]. Geology in China, 2004, 31 (3): 225-239 (in Chinese).
- [64] LI Haibing, XU Zhiqin, CHEN Wen. Deformational features and tectonic evolution of the south Kunlun strike-slip shear zone, East Kunlun mountains [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1996 (Special issue): 16-21.
- [65] WAN Xiaoqiao, DING Lin, LI Jianguo, et al. Latest Cretaceous to early Eocene marine strata in the Zhongba region, Tibet [J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25 (4): 267-272 (in Chinese).
- [66] MA Lifang, MIN Longrui, XIE Liangzhen, et al. Geological map of China, 1:2 500 000 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004 (in Chinese).

参考文献:

- [3] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英 [J]. 地质学报, 2001, 75 (2): 175-179.
- [4] 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据 [J]. 科学通报, 2002, 47 (3): 231-234.
- [5] 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据 [J]. 科学通报, 2001, 46 (16): 1333-1338.
- [6] 李海兵, 杨经绥. 青藏高原北部白垩纪隆升的证据 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (4): 345-359.
- [7] 杨经绥, 孟繁聪, 张建新, 等. 重新认识阿尔金断裂东段红柳峡火山岩的时代及构造意义 [J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31 (增刊): 83-89.
- [8] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别 [J]. 地质学报, 2002, 76 (1): 184-195.

- [10] 杨建军. 中国东部山东和江苏北部的榴辉岩、辉石岩和有关的超基性岩[M]. 北京:地质出版社,1991:26-52.
- [11] 杨经绥,许志琴,李海兵,等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报,1998,43:1755-1760.
- [12] 杨经绥,许志琴,宋述光,等. 青海都兰榴辉岩的发现:试论我国中央造山带中的高压-超高压变质带的分布及构造意义[J]. 地质学报,2000,74:156-168.
- [13] 杨经绥,张建新,孟繁聪,等. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨[J]. 地学前缘,2003,10(3):291-314.
- [14] 杨经绥,刘福来,吴才来,等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用:来自含柯石英锆石的定年证据[J]. 地质学报,2003,77(4):463-477.
- [15] 张建新,杨经绥,许志琴,等. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄:来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据[J]. 地球化学,2000,29(3):217-222.
- [17] 宋述光,杨经绥. 柴北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体:超高压变质作用的证据[J]. 地质学报,2001,75(2):180-185.
- [18] 刘良,车自成,罗金海. 阿尔金西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报,1996,41(14):1485-1488.
- [19] 张建新,张泽明,许志琴,等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄[J]. 科学通报,1999,44(10):1109-1112.
- [21] 校培喜,王永和,张汉文,等. 阿尔金山中段高压超高压带(含菱镁矿)石榴子石二辉橄榄岩的发现及其地质意义[J]. 西北地质,2001,34(4):67-74.
- [22] 刘良,孙勇,肖培喜,等. 阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴二辉橄榄岩[J]. 科学通报,2002,47(9):657-662.
- [29] 王希斌,鲍佩声,邓万明,等. 喜马拉雅岩石圈构造演化——西藏蛇绿岩[M]. 北京:地质出版社,1987:1-328.
- [33] 陆永增. 苏北超基性岩某些超高压变质特征[J]. 江苏地质,1998,22(1):1-9.
- [34] 杨经绥,许志琴,白文吉,等. 苏鲁地区榴辉岩中发现金刚石——21世纪我国潜在的寻找金刚石矿床的远景地区[J]. 地学前缘,1999,6(1):69.
- [35] 徐树桐,刘贻灿,陈冠宝,等. 大别山/苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石[J]. 科学通报,2003,48(10):1069-1075.
- [40] 刘福来. 南苏鲁毛北地区片麻岩锆石中的特殊矿物包体:指示>120 km 深俯冲的证据[J]. 岩石学报,2003,19(3):479-489.
- [46] 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.
- [47] 张建新,杨经绥,许志琴,等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. 科学通报,2002,47(3):231-234.
- [48] 许志琴,杨经绥,张建新,等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报,1999,73(3):193-205.
- [49] 葛肖虹,刘俊来. 祁连山带的形成与背景[J]. 地学前缘,1999,6(4):223-230.
- [56] 李海兵,FRANCK V,许志琴,等. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化[J]. 中国地质,2006,33(2):239-255.
- [58] 张江东,宋国奇,柳忠良,等. 郯庐断裂带南段巨左行平移时间的地震显示[J]. 地学前缘,2003,10(4):582.
- [59] 常小涛,胡建国. 郯庐断裂与华北地块扬子地块的拼合[R]. (未发表数据).
- [63] 杨经绥,王希斌,史仁灯,等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩:一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质,2004,31(3):225-239.
- [65] 万晓樵,丁林,李建国,等. 西藏仲巴地区白垩纪末期—始新世早期海相地层[J]. 地层学杂志,2001,25(4):267-272.
- [66] 马丽芳,闵隆瑞,谢良珍,等. 中国地质图,1:250万[M]. 北京:地质出版社,2004.