

青藏高原北缘 岩石圈构造 应力场

王连捷
崔军文
武红岭
张利容
王 薇
著

5492

冶金工业出版社

总 序

“青藏高原北缘变形动力学研究”是地质矿产部“八五”重点深部地质研究项目，属当代“大陆动力学计划”研究的重要组成部分，是探索新的全球构造的前沿问题，举世瞩目。

“大陆动力学计划”是国际地学界 80 年代末和 90 年代初，在“岩石圈计划”研究的重点转移到地质过程和动力学的基础上，为进一步充实板块构造理论和发展新的全球构造理论而拟定的。计划本身就说明它是地球科学发展的前沿。

作者选择青藏高原北缘开展大陆动力学研究是在青藏高原造山复合体与周缘刚性地块的接壤带发现丰富的动力学信息而确定的，认为青藏高原腹地与阿尔金山、昆仑山、祁连山甚至天山和塔里木盆地都处于统一的地球动力学体系，表明解决高原隆升机制问题的关键必须要深入研究高原北缘变形动力学，是大陆动力学研究的热点地区。该项目包括青藏高原北缘构造变形和隆升机制的研究，重点探讨阿尔金断裂系，特别是左行走滑系统，以及综合研究青藏高原北缘岩石圈构造应力场。

在研究方法上，以水平扩展和垂向伸展为基本动力学思想。运用早造山期、主造山期和后造山期造山带变形阶段的划分及变形分析与数值模拟相结合的方法。对该地区国内外前人已有的地质学、岩石地球化学和地球物理学的文献资料进行综合分析，通过野外详细的观察和室内现代化的测试。将后造山期变形和青藏高原隆升机制进行了模拟。依据特提斯—喜马拉雅构造域岩石圈的新生代构造变形和结构特征的分析，首次提出青藏高原造山复合体的新观点和高原隆升的深层热动力扩展动力学模式的新思维。并根据后造山期构造变形动力学特征，划分为喜马拉雅型、冈底斯型和昆仑型三种成因类型。以上成果观点创新，起点很高，突破了青藏高原的形成和演化的研究。

《青藏高原的后造山期变化和隆升机制》《阿尔金断裂系》和《青藏高原北缘岩石圈构造应力场》这三本优秀专著的出版，无疑将极大地提高我国大陆动力学研究的水平。该项工作是在复杂的造山带和盆地耦合地区，环境极为恶劣，工作十分艰辛，时间又很短促的情况下完成的，这种敬业精神值得我们学习。在此谨向参加工作的全体同志表示衷心的祝贺！

南京大学教授
中国科学院院士

郭令智

1996. 10. 8

序

近 20 年以来,青藏高原受到国内外地学界的密切关注,成为全球热点研究地区之一。人们把青藏高原视为研究大陆岩石圈构造演化和动力学,探索地球奥秘的重要基地。《青藏高原北缘岩石圈构造应力场》是地质矿产部“八五”深部地质研究重点项目“青藏高原北缘变形动力学研究”的重要组成部分,是大陆岩石圈构造变形动力学定量分析的重要方面,具有重要的理论意义和实用价值。

在综合分析青藏高原北缘及其相邻地区构造变形资料的基础上,进行青藏高原北缘岩石圈构造应力场分析研究,建立地质构造模型,配合有代表性岩类的高温高压岩石力学性态试验,在印度板块向北推挤俯冲力、重力、地幔上拱导致温度升高引起的热应力等动力联合作用下进行弹性、粘弹性、弹塑性多种有限元数值模拟,合理地阐述了青藏高原北缘不同圈层、不同地域(空间上)构造变形的动力学成因。首次提出热应力对高原隆升变形的重要作用,指出了热应力分布的基本特征及其对构造变形的影响。提出青藏高原的隆升、缩短的主要动力源是印度板块的推挤和俯冲、重力和热应力共同作用的结果。在理论和方法上有所创新和发展。同时为环境等灾害研究提供了重要依据。相信本书的出版将为进一步分析高原的隆升与变形机制,推动大陆动力学研究的发展起到一定的作用。

中国地质科学院地质力学研究所 研究员
中国科学院院士

陈庆宝

1997. 3. 18

前 言

青藏高原北缘地域上包括昆仑山及其以北的阿尔金山、祁连山和柴达木盆地（三山一盆地）及“三山”的山前拗陷带，构造上占据青藏高原造山腹合体后陆部位的主体。青藏高原北缘的活动记载了该区始造山期、早造山期和主造山期古板块裂解、汇聚和拼合过程及后造山期地块四维运动轨迹。其研究对解决我国西部构造单元划分、对比，重建大地构造格架，深化青藏高原隆升和动力学机制的研究至关重要。青藏高原北缘又处于包括哈萨克斯坦板块、塔里木板块、中朝板块和青藏高原在内的中亚地区的核心部位，其研究对解决中亚地区变形运动学和动力学十分关键。总之，阿尔金地区是当前国际“大陆动力学计划”中引人瞩目的重点地区之一。为此“八五”期间地质矿产部实施了“青藏高原北缘构造变形动力学研究”项目，“青藏高原北缘岩石圈应力场研究”属该项目之第二课题。该课题的具体研究内容有：青藏高原北缘的脆性变形构造应力场；不同温压条件下岩石力学性态的试验；岩石圈构造应力场的数值模拟。其目的是通过青藏高原北缘岩石圈应力场、应变场和位移场的研究，为青藏高原隆升和动力学模型的建立提供构造应力场依据。该课题下设3个研究专题：

- (1) 青藏高原北缘脆性变形构造应力场研究；
- (2) 青藏高原北缘高温高压下岩石力学性态的实验研究；
- (3) 青藏高原岩石圈应力场的数值模拟分析。

青藏高原所以成为全球构造研究的热点，主要在于二倍于正常地壳厚度的巨厚陆壳和第四纪以来的急剧隆升。陆壳增厚和高原隆升是地质、地球物理和地球化学作用的最显观的反映，是岩石圈各种力相互作用的结果。因此，各国学者都把青藏高原视为研究现代地壳运动和岩石圈现今应力、应变状态，建立大陆动力学模式的野外实验室，而且越来越趋向量化、模型化。因此，青藏高原动力学数值模型的研究已成为目前青藏高原地学研究的重要方面。近年来出现的代表性的数值模拟研究有弹性模型；粘弹性模型；粘塑性模型（J, Vilotta, P., 1982年），粘性非线性流体模型分析（England, P., 1982年）和线性牛顿流体模型分析（Wang Chi-Yuen, 1982年）。在众多的模拟研究中影响最大者当数达包尼尔和莫尔纳（Tapponnier, P. and Molnar, P., 1975年, 1976年）的印度板块向欧亚板块楔入、挤压模拟，他们提出的滑移线场理论被广为引用。前人的模拟实验一般把地壳视为均一体，都强调岩石圈的挤压、碰撞作用，而且一般都忽视了“热应力”作用。随着青藏高原地学研究的不断深入，特别是纵向伸展构造（崔军文等，1992年）和上地幔各向异性（姜枚等，1994年）的发现，热对流（Molnar, 1976年），热柱（崔军文等，1992年）和地幔柱（许志琴等，1995年）等新思维的出台，大大深化了人们对青藏高原深部作用过程和隆升机制的认识，青藏高原的崛起和现代地壳变形不可能用单一动力学机制解释。现代地形变测量和变形动力学研究表明，造成青藏高原急剧隆升和欧亚大陆强烈后陆效应的驱动力主要来自印度板块向欧亚板块的快速俯冲和两板块的强烈碰撞，这就决定了必须将青藏高原北缘置于印度板块和欧亚板块碰撞及青藏高原隆升的统一的地球动力学体系，

才有可能模拟和研究青藏高原北缘岩石圈构造应力场。本课题作为“七五”弹性力学有限元模拟计算的继续和“九五”青藏高原岩石圈动力学理论研究的起步，在青藏高原造山复合体平面应力场、位移场分布；热应力对岩石圈构造应力场、应变场和位移场的影响；青藏高原伸展（纵向、横向）构造和青藏高原隆升的动力学模式——岩石圈深层热扩展动力学模式的力学基础等方面取得了一些重要认识。

本专著是多年来有关青藏高原岩石圈构造应力场研究的总结。各章执笔人如下：前言和第一章 崔军文；第二章 彭华、王连捷；第三章 李有社、高静、王薇、王连捷；第四章 张利容、王连捷、袁嘉音；第五章 王连捷、王薇；第六章 王薇、王连捷；第七章 武红岭、王薇、王连捷；第八章 张利容、王连捷、袁嘉音；结论和讨论 王连捷。

另外，崔四平、马越参加了岩石力学的实验工作。

目 录

第一章 青藏高原北缘的新生代变形和构造变形动力学模型	1
第一节 青藏高原北缘的大地构造位置和前新生代构造.....	1
第二节 阿尔金断裂系.....	2
第三节 青藏高原隆升的动力学模式——岩石圈深层热扩展动力学模式.....	5
第二章 高温高压下岩石力学性质的实验研究	11
第一节 实验的目的、意义	11
第二节 实验方法	12
第三节 实验结果及分析	16
第四节 大陆岩石圈的变形机制	23
第五节 小结	24
第三章 断层擦痕和震源机制解确定的应力场	26
第一节 由断层擦痕确定的应力场	26
第二节 由震源机制解确定的应力场	29
第三节 邻近地区地应力测量结果	34
第四节 青藏高原及北缘现代构造应力场的主要特征	34
第四章 青藏高原北缘应力场的平面有限元计算	36
第一节 计算范围与网格划分	36
第二节 约束条件、材料常数和边界力	36
第三节 计算结果	38
第五章 热应力场的一般分析	42
第一节 计算热应力使用的本构关系	42
第二节 不同温度梯度引起的应力场	43
第三节 温度局部升高引起的应力场和位移场	47
第六章 剖面应力场的有限元计算	50
第一节 剖面范围与网格划分	50
第二节 材料常数、约束与载荷条件	50
第三节 剖面应力场计算的结果	51
第七章 青藏高原的隆升及其粘弹性形变分析	60
第一节 粘弹性模型的力学性质	60
第二节 模拟计算的思路 and 实现方法	61
第三节 模型选择	61
第四节 结果分析与讨论	62
第五节 主要结论和存在问题	66

第八章 青藏高原弹塑性变形场的有限元分析 67

 第一节 采用的塑性屈服准则 67

 第二节 弹塑性本构关系 68

 第三节 剖面模型的建立 69

 第四节 边界及载荷条件 70

 第五节 模拟结果及初步分析 70

结论和讨论 73

参考文献 75

Contents

Chapter 1 Cenozoic deformation and tectonic deformation dynamic model in northern border in Tibet plateau	1
Section 1 Tectonic location and cenozoic tectonic in Northern border in Tibet plateau	1
Section 2 Altun fractural zone	2
Section 3 Dynamic model of the uplift of Tibet plateau—A lithospheric deep thermol spreading model	5
Chapter 2 Experimental study of rock mechanics behavior under high temperature and high pressure	11
Section 1 Purpose and significance of experiment	11
Section 2 Experimental method	12
Section 3 Analysis of experimental results	16
Section 4 Deformation mechnism of continental lithospher	23
Section 5 Brief	24
Chapter 3 Stress field from fauld slip data and fault plane solution	26
Section 1 Stress field from fault slip data	26
Section 2 Stress field from fauld plane solution	29
Section 3 Results of in-situ stress measurement in adjacent area	34
Section 4 Main feaures of present tectonic stress field in Tibet plateau	34
Chapter 4 Calculation of two dimensianal stress field by finite element method in Northen border in Tibet plateau	36
Section 1 Limits and mesh	36
Section 2 Boundary condition and material constant	36
Section 3 Result of calculation	38
Chapter 5 General analysis of thermal stress field	42
Section 1 Constitution of calculating thermal stress	42
Section 2 Stress field under diferent temperature gradiend	43
Section 3 Stress field and displacement field cauced by local increase in tempereature	46
Chapter 6 Stress field calculation in profile by finite element method	50
Section 1 Limit and mesh	50
Section 2 Boundary condition and material constant	50
Section 3 Results of calculation of stress field in profile	51

Chapter 7 Uplift of Qinghai—Tibet plateau and analysis of visco—elastic deformation	60
Section 1 Mechanical properties of visco—elastic model	60
Section 2 Train of thought and method of calculation	61
Section 3 Model selection	61
Section 4 Analysis and discussion of result	62
Section 5 Conclusion and problem	66
Chapter 8 Analysis of finite element of elastic—plastic deformation field in Qinghai—Tibet plateau	67
Section 1 Plastic yield criterion	67
Section 2 Elas—plastic constitution	68
Section 3 Construction of profile model	69
Section 4 Boundary and load condition	70
Section 5 Results and preliminary analysis	70
Conclusion and discussion	73
Reference	75

第一章 青藏高原北缘的新生代 变形和构造变形动力学模型

第一节 青藏高原北缘的大地构造位置和前新生代构造

青藏高原北缘占据青藏高原造山复合体后陆的重要构造部位,包括东、西昆仑山以北、塔里木地块和阿拉善—鄂尔多斯地块以南的广大地域,其主要成分有阿尔金山、祁连山、柴达木盆地和东、西昆仑山(三山一盆)。其主体构造成分为阿尔金构造带和祁连构造带,两者构成向北突出的弧形构造带,与青藏高原南缘向南突出的喜马拉雅弧形构造带(图 1-1)遥相对应,对青藏高原腹地的构造演化起着重要的制约作用。

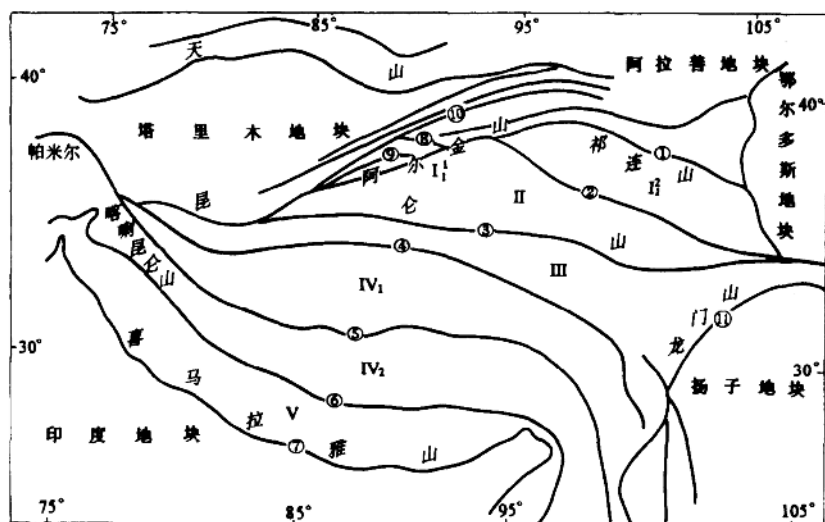


图 1-1 青藏高原及邻区构造单元示意图

- I—阿尔金-祁连构造带; I₁—阿尔金构造带; I₂—祁连构造带; II—昆仑构造带;
 III—可可西里-巴颜喀拉构造带; IV—冈底斯-羌塘构造带; IV₁—羌塘构造带; IV₂—冈底斯构造带; V—喜马拉雅构造带; ①—北祁连断裂; ②—南祁连断裂; ③—中昆仑断裂; ④—金沙江断裂; ⑤—班公湖断裂; ⑥—雅鲁藏布江断裂; ⑦—主边界断裂; ⑧—北阿尔金断裂;
 ⑨—南阿尔金断裂; ⑩—阿尔金断裂系; ⑪—龙门口断裂

阿尔金构造带可区分为两套不同性质的区域构造系:东西向的前新生代构造系和北东东向的阿尔金(活动)断裂系。东西向的前新生代构造系由塔里木南缘晚太古—早元古代变质杂岩带、北阿尔金早古生代火山沉积岩-蛇绿岩带组成。之间以俯冲型韧性剪切带或深

层韧性剪切带为界, 往西潜没于塔里木盆地之下 (图 1-2)。北阿尔金早古生代火山沉积岩—蛇绿岩带、中阿尔金隆起带和南阿尔金早古生代火山沉积岩—蛇绿岩带大致可分别与北祁连早古生代火山沉积岩—蛇绿岩带、中祁连隆起带和柴达木盆地北缘早古生代火山沉积岩—蛇绿岩带相对比, 说明早古生代时, 前人肯定的北祁连洋盆和柴达木北缘裂陷槽或洋盆曾扩展到阿尔金地区, 阿尔金地区的东西向新生代构造系属祁连构造带的西延, 后者的主构造线方向为东西向。阿尔金—祁连早古生代洋盆的扩张期为晚寒武世—奥陶纪, 早古生代晚期洋盆闭合, 南阿尔金早古生代火山沉积岩—蛇绿岩和柴达木盆地北缘早古生代火山沉积岩—蛇绿岩属同一裂陷槽或洋盆产物, 推测为昆仑洋盆的一部分, 其扩张和闭合过程与阿尔金—祁连洋盆类似, 但时间短。华力西期到燕山期, 阿尔金地区进入另一构造演化阶段, 以华力西期与板块俯冲有关的 I 型花岗岩开始, 经印支期—燕山早期陆内碰撞和 S 型花岗岩、混合岩化作用, 至燕山晚期与陆陆碰撞后造山期拉张作用有关的碱性花岗岩结束, 构成一完整的造山旋回。新生代阿尔金地区进入以北东东向阿尔金 (活动) 断裂系为主的构造演化阶段。

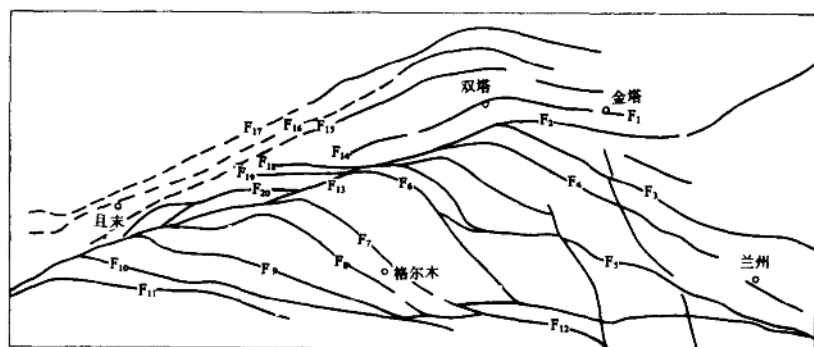


图 1-2 青藏高原北缘断裂构造分布

F₁—阿拉善南缘冲断裂; F₂—走廊北缘冲断裂; F₃—北祁连冲断裂; F₄—中祁连冲断裂;
F₅—南祁连冲断裂; F₆—赛什腾逆冲-左行走滑断裂; F₇—柴中冲断裂; F₈—祁漫塔格冲
断裂; F₉—阿尔喀山冲断裂; F₁₀—鲸鱼湖断裂; F₁₁—木孜塔格断裂; F₁₂—
中昆仑断裂; F₁₃—阿尔金南缘断裂; F₁₄—阿尔金北缘断裂; F₁₅—米兰-
红柳园断裂; F₁₆—且末-黑尖山断裂; F₁₇—罗布庄-星星峡断裂; F₁₈—
北阿尔金断裂; F₁₉—中阿尔金断裂; F₂₀—南阿尔金断裂

第二节 阿尔金断裂系

一、阿尔金断裂系的几何学特征

阿尔金断裂系是由 5 条断裂组成的长约 1600km 的巨型左行走滑断裂, 由南东往北西依次为: 阿尔金南缘断裂、阿尔金北缘断裂、米兰—红柳园断裂、且末—黑尖山断裂和罗布庄—星星峡断裂 (图 1-2)。阿尔金南缘断裂由一系列弧顶向北突出的弧形断裂逐段连结而成, 其内侧散布有一系列不同时代 and 不同规模、沿其呈雁列式展布的中、新生代构造盆地, 构成昆仑山以北至走廊过渡带典型的盆-山构造格局 (图 1-3)。在茫崖、当今山口和肃

北等地卷入逆冲断裂带的前中生代地层中出现有互相交切的三期变形构造：第一期东西走向的逆冲、推覆型流壁理，拉伸线理南北向；第二期北东东走向、陡倾的左行走滑型流壁理，以缓倾斜的渗透性拉伸线理为主，第三期为北东东走向、向北西陡倾的正—左行走滑型破劈理，以近于直立的擦痕线理为主。因此推测与弧形断裂段呈同形弯曲的山链属逆冲叠覆型或走滑型山链。分布在弧形断裂内侧的一系列中、新生代盆地是在逆冲-推覆和走滑作用过程中形成的滞后拉张型或拉分型盆地。弧形逆冲断裂在祁连山区转变为北西西走向、向南高角度倾斜的斜冲断裂（逆冲—左行走滑断裂），明显切割前长城系敦煌群片麻岩中近于东西向直立的流劈理，在走廊南缘可见前新生代地层斜冲、推覆在第四纪酒泉砾岩之上。

上述资料表明阿尔金断裂系是在近于东西走向的逆冲断裂基础上发育而成，其早期可能表现为逆冲断裂，继后以左行走滑为主，最后转化为正—左行走滑断裂。依据目前所获得的逆冲-推覆型流劈理中变形矿物黑云母、角闪石和绢云母的同位素年龄值，并结合断裂带中花岗岩时代、性质和区域沉积历史分析，特别是阿尔金断裂系控制的新生代构造盆地时代，大致可将阿尔金断裂系的形成划分为5期：三叠纪、侏罗纪、白垩纪—始新世、渐新—上新世和第四纪，阿尔金断裂系的左行走滑量主要与阿尔金南缘断裂活动有关，而且具有强烈不均一性，根据两侧构造单元对比及构造地层展布，估算的左行走滑量：当金山口以西的南西段为800~900km，以东的北东段为350~400km，平均走滑速率分别为3.2~3.6mm/a和1.4~1.6mm/a（详见第一课题报告）。

二、青藏高原北缘的倒退式逆冲断裂系

位于昆仑山以北、北山以南的阿尔金-祁连地区，存在一系列以极性向北为主的逆冲、推覆构造（图1-4），规模较大的逆冲断裂，除发育良好的前新生代深层次韧性剪切应变现象外，一般沿断裂带分布有不同成因类型的古生代和中生代花岗岩类岩石、蛇绿构造混杂岩及高压变质岩，表明它们是由古俯冲带演化而来，具有长期形成、演化历史。逆冲断裂的形成时代，有由北往南、由老到新的变化趋势。阿拉善南缘逆冲断裂和南祁连逆冲断裂始于三叠纪，侏罗—白垩世时期，除继承性活动外，在两条断裂南侧各形成北祁连逆冲断裂、柴达木北缘逆冲断裂；白垩纪—始新世时期，逆冲、推覆作用主要发育在中、南祁连和柴达木北缘，早期逆冲断裂除强烈继承性活动外，新生有中祁连逆冲断裂；渐新—上新世时期，逆冲、推覆作用往南迁移，柴中冲断裂形成，柴达木北缘逆冲断裂和祁漫塔格逆冲断裂进入强烈活动时期；上新世以后，发生遍及全区的逆冲、推覆作用，以致更新世前地层普遍逆冲、推覆在第四纪世地层之上（图1-5）。总体上显示后陆部位极性向北的逆冲断裂随着时间的推移，由北往南倒退式扩展的演化过程，形成与弧顶向南突出的喜马拉雅前陆前进式逆冲断裂系类似，但极性相反的、弧顶向北突出的倒退式逆冲断裂系及盆—山或盆—岭相同的构造格局。

三、阿尔金断裂系的形成机制

阿尔金断裂系经历了由北往南逐段生长、连接的形成演化过程。

组成青藏高原北缘倒退式逆冲断裂系的主要断裂，其形成时代和青藏古陆古板块汇聚、拼合及青藏高原隆升时期基本能对应，表明两者间有密切成因联系。逆冲作用始于三叠纪古特斯洋闭合、塔里木—中朝板块与扬子板块汇聚、拼合时期；至侏罗纪，大致相当羌塘地体与冈底斯—念青唐古拉地体汇聚、新特提斯洋北支闭合时期（崔军文等，1992年），逆冲—推覆作用随着古俯冲带位置南移而迁移至北阿尔金、北祁连一线，早期出现的逆冲断

裂往北扩展；新特提斯洋南支闭合，即雅鲁藏布江古俯冲带形成时期，是青藏高原最为重要的变形阶段。

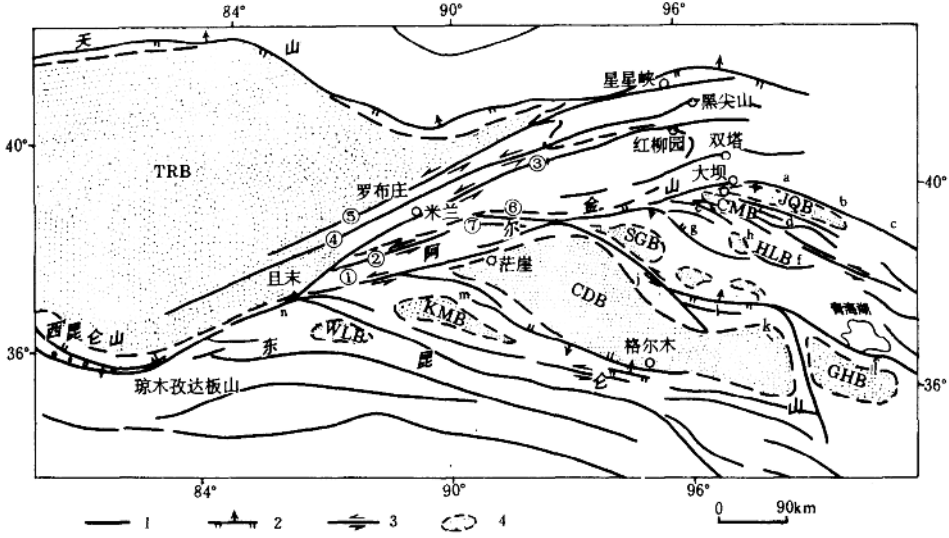


图 1-3 阿尔金断裂系及其两侧盆、山分布示意图

1—正断裂；2—冲断裂；3—左行走滑断裂；4—盆地边界；①—阿尔金南缘断裂（SAF）；②—阿尔金北缘断裂（NAF）；③—米兰-红柳园断裂（MHF）；④—且末-黑尖山断裂（QHF）；⑤—罗布庄-星星峡断裂（LXF）；⑥—金雁山北缘韧性剪切带（NJS）；⑦—金雁山南缘韧性剪切带（SJS）；WLB—乌鲁木齐盆地；KMB—库木湖盆地；CDB—柴达木盆地；SGB—苏干湖盆地；HLB—哈拉湖盆地；CMB—昌马盆地；JQB—酒泉盆地；GHB—共和盆地；TRB—塔里木盆地；a—宽滩山；b—合黎山；c—龙首山；d—走廊南山；e—野马南山；f—疏勒山；g—党河南山；h—疏勒南山；i—宗务隆山；j—赛什腾山；k—鄂拉山；l—青海南山；m—祁漫塔格山；n—托库孜达坂山

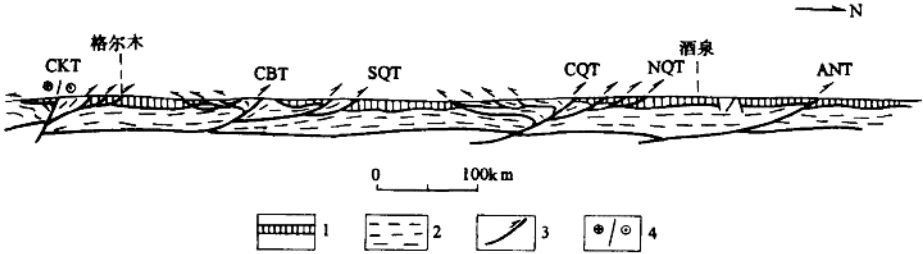


图 1-4 青藏高原北缘构造剖面

1—显生宙沉积盖层；2—强流劈理化结晶基底；3—冲断裂；4—正-左行走滑断裂
CKT—中昆仑冲断裂；CBT—柴达木北缘冲断裂；
SQT—南祁连冲断裂；CQT—中祁连冲断裂；
NQT—北祁连冲断裂；ANT—阿拉善山南缘冲断裂

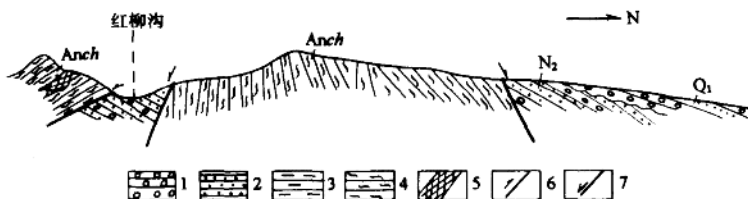


图 1-5 红柳沟冲断裂剖面

1—砾岩；2—砂岩；3—片岩；4—片麻岩；5—超基性岩；6—冲断裂；7—正断裂

白垩纪—始新世印度板块和欧亚板块强烈碰撞，西藏陆壳急剧缩短和增厚，导致大量陆壳物质向北运移，处于后陆部位的北山至祁连地区发生强烈后造山期变形，先前形成的逆冲断裂表现为继承性活动，沿逆冲断裂带发育黑河盆地、托莱河盆地等冲断型盆地。柴达木北缘早白垩世碱性花岗岩的出现表明柴达木地块进入南北向扩张时期，而阿尔金断裂系以西的西昆仑和塔里木盆地结合带部位则处于挤压状态，构造特征的差异表明始于三叠纪形成的阿尔金左行走滑断裂进入强烈活动期（详见第一课题报告）。估计侏罗纪—始新世时期，阿尔金断裂左行走滑速率约为 1.7mm/a ，柴达木盆地的扩张速率为 0.6mm/a 左右，明显小于三叠纪时期（走滑速率和扩张速率分别为 3.1mm/a 和 1.1mm/a ）。随着后陆部位由南往北的急剧扩展和逆冲断裂往南迁移，至渐新—上新世时期，阿尔金左行走滑断裂进入强烈活动阶段，估计这一时期的左行走滑速率约为 $9.2\sim 28.0\text{mm/a}$ ，扩张速率为 $3.1\sim 9.6\text{mm/a}$ ，柴达木盆地急剧拗陷，形成 $9000\sim 11000\text{m}$ 的巨厚沉积。上新世后，阿尔金左行走滑断裂进入定型期。印度板块和欧亚板块的强烈碰撞，导致高原急剧隆升和后陆部位向北急剧扩展的强大后陆效应。第四纪地层，在柴达木盆地厚度近 800m ，甘肃走廊地带厚度为 1300 余米，北山地区仅厚 100m ，说明第四纪活动中心在柴达木盆地，其次为河西走廊，中、南祁连和北山继续渐新—上新世时期上隆的构造格局，阿尔金走滑断裂随着鲸鱼湖断裂和祁漫塔格冲断裂的发育，而继续向北西方向扩展，同时，随着青藏高原腹地的急剧隆升而逐渐由左行走滑转化为正—左行走滑（详见第一课题报告）。这一时期，后陆部位的扩展速率分别为 $4.1\sim 12.0\text{mm/a}$ ，阿尔金断裂左行走滑速率为 $12.0\sim 35.1\text{mm/a}$ 。

上述分析表明阿尔金断裂系的形成与青藏高原古陆由北往南增生、印度板块和欧亚板块持续、强烈碰撞导致的后陆部位向北扩展及高原急剧隆升有关，是一条陆陆碰撞后造山期的陆内转换（走滑）断裂。阿尔金断裂系的形成、演化过程提供了青藏高原隆升的动力学模式——岩石圈深层热扩展动力学模式的重要佐证。

第三节 青藏高原隆升的动力学模式—— 岩石圈深层热扩展动力学模式

一、隆升研究历史回顾

素有地球第三极之称的青藏高原，之所以成为国际地学界研究热点，主要在于二倍于正常地壳厚度的巨厚陆壳（ 70km ）和第四纪以来的急剧隆升，前者是阿尔冈（1924）提出印度地台向青藏高原俯冲观点的基本依据。自从 E. 阿尔冈（1924 年）提出印度地盾向青藏高原俯冲的观点后，俯冲作用在解释青藏高原的形成和演化过程中一直占主导地位，由此

而衍生出许多不同的假说,如印度大陆向青藏高原俯冲,导致双陆壳结构和均一海拔厚度说(Powell, C. M., Conaghan, P. J., 1973年),叠瓦状俯冲模式(Molnar, P., 1975年),逆冲—叠覆模式(Tapponnier, P., et al., 1981年; Allegre, C. J., 1984年; 1981年 Hirn, A., 1984年),滑脱—叠覆模式(Mattauer, M., 1986年; 许志琴, 1988年),不同构造层的冲断和叠覆模式(李廷栋, 1988年),南北向俯冲和均衡隆升模式(常承法, Shackleton, R. M., et al., 1990年),南北向俯冲模式(吴功建, 1989年; 曾融生等, 1991年),挤压嵌入(楔入)模式(Zhao Wu-Ling, Morgan, J., 1985年; Tapponnier, P., Peltzer, G. et al., 1986年),这些模式或假说依据的基本事实是青藏高原,特别是喜马拉雅造山带出现的强烈逆冲-推覆或韧性剪切作用和高原的双倍地壳厚度,基本观点是强调由于印度板块向北俯冲导致青藏高原陆壳南北向强烈缩短、增厚,高原均衡隆升,但这种观点忽视了造山作用,特别是后造山晚期青藏高原普遍出现的伸展作用和岩石圈组构(结构、构造)的不均一性(崔军文等, 1992年)。

70年代中期,达包尼尔和莫尔纳(Tapponnier P., 和 Molnar, P., 1976年)模拟青藏高原及欧亚大陆的大面积变形后,运用滑移线场理论,解释了青藏高原的新生代构造和隆升,认为青藏高原的隆升与高原内部存在的大规模东西向走滑和侧向流动有关。这种模式过于强调东西向走滑运动和物质流动导致南北向陆壳缩短的意义,缺乏高原内部大规模东西向走滑运动和高原周缘,特别是东缘新生代沉积和物质作大规模东西向侧流动或“逃跑”运动的地球物理佐证。

笔者在以前的论文及专著(崔军文等, 1989年, 1992年; 许志琴、崔军文, 1995年)中一直强调了后造山过程的深层热扩展作用,并结合青藏高原造山复合体的岩石圈组构特征,提出了陆壳增厚和隆升的地球动力学模式——岩石圈深层热扩展动力学模式。

二、岩石圈深层热扩展动力学模式的主要依据

岩石圈深层热扩展动力学模式的主要依据有:

(1) 青藏高原快速上隆及崛起阶段为更新世的后造山阶段,与此同步的构造现象有前陆的推覆叠置及后陆的逆冲与走滑,围绕青藏高原的周边地带,古老结晶岩石往外推覆在刚性的印度地块、塔里木地块、阿拉善-鄂尔多斯地块及扬子地块之上,也就是说具刚性流变学的块体插入(俯冲于)具塑性流变学的高原之下,并形成山前拗陷带,堆积巨厚的磨拉石(图1-6);

(2) 高原内部以东西走向的纵向正断裂(图1-7)和断续延伸的南北向正断裂及地堑为特征。沿纵向正断裂普遍出现新生代岩浆活动、纵向断陷盆地及复杂的深源岩石组合(崔军文, 1992年);

(3) 根据CP面波资料,青藏高原腹地纵向速度较邻区低,在腹地中心部位存在一个低速区,其范围大致位于冈底斯地块中部,中心位于那曲地区,深度约50km,并延深到整个地壳(曾融生等, 1992年)。低速区大致和地表热水活动(佟伟等, 1981年)、高热流区(沈显杰等, 1990年)和新生代岩浆活动区相对应(图1-8),说明青藏高原以腹地为中心的陆壳高温区的存在;

(4) 地震测深资料反映青藏高原腹地深部存在壳幔混合层,冈底斯地块壳幔混合层厚26~29km,波速为6.7~7.4km/s(崔作舟等, 1992年),和世界上一些著名裂谷区上地幔顶部震波速度值接近。壳幔混合层的成因推测与岩石圈地幔上涌、壳幔间强烈拆离和壳幔

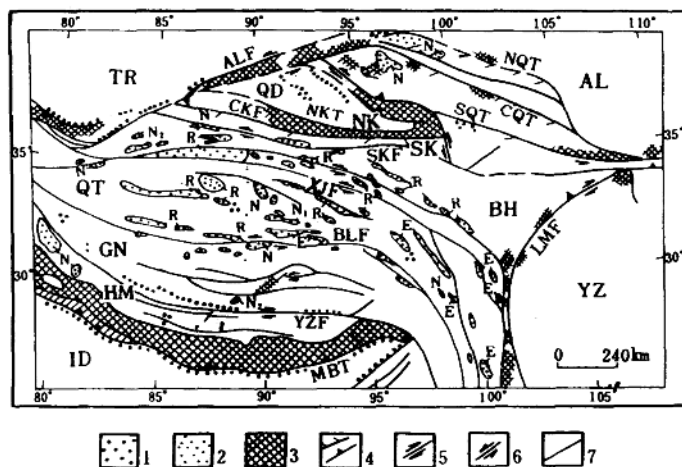


图 1-6 青藏高原结晶基底和新生代盆地分布示意图

1—上新-更新世磨拉石盆地；2—第三纪盆地；3—结晶基底；4—冲断层；5—左行走滑断层；6—右行走滑断层；7—大断裂。YZF—雅鲁藏布江正-右行走滑断裂；BLF—班公湖-澜沧江正-左行走滑断裂；TJF—西金乌兰-金沙江正-左行走滑断裂；SKF—南昆仑正-左行走滑断裂；CKF—中昆仑断裂；ALF—阿尔金左行走滑断裂；LMF—龙门山冲断裂；MBT—主边界冲断裂；NQT—北祁连冲断裂；CQT—中祁连冲断裂；SQT—南祁连冲断裂；HM—喜马拉雅地体；GN—冈底斯-念青唐古拉地体；QT—羌塘地体；BH—巴颜喀拉地体；SK—南昆仑地体；NK—北昆仑地体；QD—柴达木地块；TR—塔里木地块；AL—阿拉善地块；YZ—扬子地块；ID—印度地块

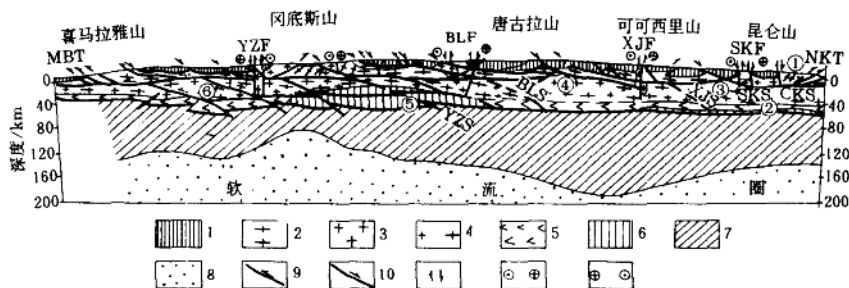


图 1-7 青藏高原亚东-格尔木地质断面简图（曲率投影）

1—沉积盖层（Z—R）；2—强流劈理化结晶基底（Pt）；3—花岗岩；4—强流劈理化花岗—闪长质岩层（中地壳）；5—高温、强应变的麻粒岩层（下地壳）；6—异常地幔或壳幔混合层；7—岩石圈上地幔；8—软流圈；9—逆冲断裂或韧性推覆剪切带；10—正断裂或滑覆剪切带；11—直立张裂带；12—左行走滑断裂；13—右行走滑断裂；①—北昆仑地体；②—南昆仑地体；③—巴颜喀拉地体；④—羌塘地体；⑤—拉萨地体；⑥—喜马拉雅地体；NKT—北昆仑冲断裂；SKF—南昆仑正-左行走滑断裂；XJF—西金乌兰-金沙江正-左行走滑断裂；BLF—班公湖-澜沧江断裂；YZF—雅鲁藏布江正-右行走滑断裂；MBT—主边界冲断裂；CKS—中昆仑缝合带；SKS—南昆仑缝合带；XJS—沱沱河-金沙江缝合带；BLS—班公湖-澜沧江缝合带；YZS—雅鲁藏布江缝合带

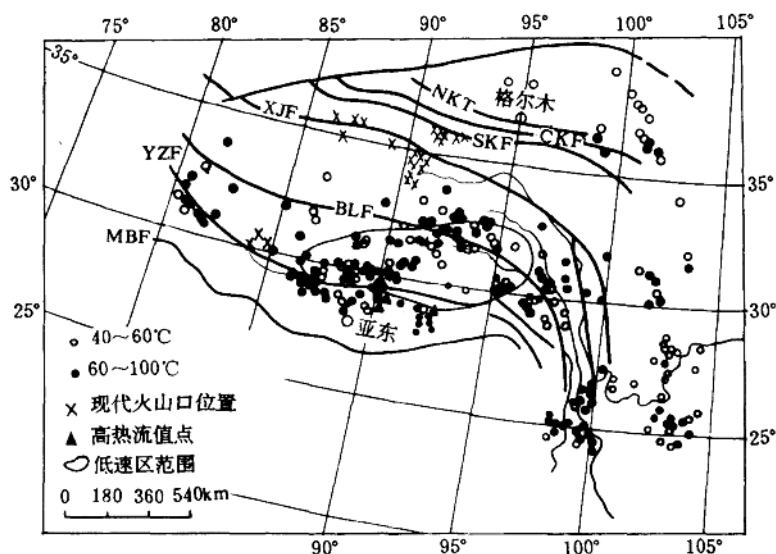


图 1-8 青藏高原腹地水热活动区、现代火山口、高热流值和地壳低速区分布
(据佟伟, 1981; 曾融生等, 1992; 资料编制)

物质穿插及软流圈上隆有关(崔军文等, 1992 年)。整个青藏高原岩石圈结构, 冈底斯地块以薄壳薄幔及热壳热幔型组构而区别于北侧(唐古拉、巴颜喀拉、昆仑)的厚壳厚幔、冷壳冷幔型组构, 及南侧(喜马拉雅)的厚壳薄幔、热壳冷幔组构。

三、岩石圈深层热扩展动力学模式的基本观点

岩石圈深层热扩展动力学模式的基本观点可概括为:

(1) 青藏高原岩石圈变形具强烈不均一性。高原周缘总体上处于挤压状态, 但南缘喜马拉雅前陆弧形构造带, 特别是弧顶向北突出的东、西两犄角部位较北缘阿尔金—祁连后陆弧形构造带强烈, 而青藏高原腹地以垂向伸展和东西向拉张为主。但岩石圈不同构造层之间变形具有明显差异, 高原周缘上地壳以逆冲—推覆为主, 即相对热的、塑性的上地壳不断向围限高原的冷的、刚性的塔里木、阿拉善—鄂尔多斯、扬子 and 印度等地块逆冲、推覆, 具有高度流变性的下地壳以构造透镜体化或香肠化为主。岩石圈地幔以南北向俯冲型韧性剪切作用(周缘的刚性陆块向相对塑性的高原俯冲)和东西向拉伸张作用为主。

(2) 水平拆离(或平流运动)和垂向运动(底辟和热隆扩展)是岩石圈深层物质运动的两种基本形式。印度板块俯冲导致的碰撞带陆壳加积、增厚和局部熔融及由此而诱导的重力不稳定, 在岩石圈中产生强大的水平侧向流动(拆离或平流)和垂向运动(热隆扩展作用和底辟作用)。前者将导致不同构造层内物质的迁移, 并制约不同构造层次间的逆冲—推覆构造或科帕构造、扇形流劈理、纵向正断裂和以其为边界的垒—堑构造的形成及叠置其上的复杂的构造岩石组合(崔军文等, 1992 年)。青藏高原腹地断块结合带目前处于南北