

青藏高原的构造分区及其边界的变形构造特征

崔军文 张晓卫 唐哲民

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:宏观构造特征的确立对青藏高原隆升和“动力学建模”具有重要意义。青藏高原是由来自塔里木—中朝板块的北昆仑—阿尔金—祁连山地体, 华南—东南亚板块的南昆仑地体、可可西里—巴颜喀拉地体和冈瓦纳古陆的羌塘地体、冈底斯地体及喜马拉雅地体等 3 大板块(或古陆)的 6 个地体经多次裂解、会聚和陆内俯冲作用拼合而成的巨型“会聚—陆内俯冲型”岩石圈块体, 它以青藏高原南缘结合带、青藏高原北缘结合带和青藏高原东缘结合带依次与印度岩石圈块体、塔里木—阿拉善—鄂尔多斯岩石圈块体和扬子岩石圈块体相隔。按现今动力学特征, 这一巨型岩石圈块体(一级构造单元)又可进一步划分为喜马拉雅、藏北、青南和昆仑—阿尔金—祁连等 4 个二级构造单元(地块), 它们依次以雅鲁藏布江结合带、西金乌拉—金沙江结合带、中昆仑结合带为界。4 个地块又可进一步划分为若干以断裂为界的三级构造单元(地体)。组成青藏岩石圈块体的各构造单元处于统一的地球动力学系统, 它总的表现为: 在印度板块向欧亚板块持续、强烈俯冲和热的、具柔性流变学特征的青藏块体整体向北北东方向移动的区域构造背景上, 其南、北两侧的喜马拉雅地块、昆仑—阿尔金—祁连地块分别向冷的、刚性的印度岩石圈块体和塔里木—阿拉善—鄂尔多斯岩石圈块体不对称逆冲叠覆。位于青藏高原腹部的藏北地块和青南地块, 在深部存在大量低速体向上涌动和整体自西向东扩展的区域构造背景上, 前者叠置近南北向挤压, 形成以南北向断陷带及北西和北东向共轭走滑为主的构造格局, 而青南地块除松潘—甘孜地体显示自北而南的逆冲叠覆外, 可可西里—巴颜喀拉地体以逐一向东挤出的左行走滑作用为主, 以致整个青南地块呈现向扬子岩石圈块体逆冲扩展和向三江构造带平移扩展。因此, 就现今动力学而言, 青藏高原在随着时间推移、隆升速度不断加快的同时, 还逐渐向外缘的刚性地块扩展, 即高原面积在不断增大。因此青藏高原的边界具有扩展性质, 按扩展机制可区分两类扩展型动力边界: 走滑型扩展边界和逆冲型扩展边界。典型的走滑型扩展边界位于青藏高原北缘的阿尔金山和青藏高原东缘的三江地区, 青藏高原南缘的动力边界属典型的逆冲型扩展边界, 而位于祁连山和龙门山的动力边界兼有逆冲和走滑双重扩展性质。

关键词:青藏岩石圈块体; 地块; 地体; 地球动力学系统; 俯冲; 扩展

中图分类号: P544 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)02-0256-12

综观青藏高原的地质研究历史, 构造变形的研究已成为当前青藏高原地质研究的主线之一, 各种动力学模型的提出, 无不以构造变形的资料作为其基本依据。假如将现今动力学过程视为用位移量变化来标定的一个物理过程, 变形运动学和动力学的研究则应当是解决青藏高原现今动力学问题的关键。青藏高原具有复杂的形成演化历史, 现今展现在陆表面的构造形迹是不同时期、不同性质、不同层次、不同等级和不同驱动力作用下的各种构造形迹的综合, 很显然, 不同时期、同一地区或同一时期、不同地区, 主导的构造因素和动力学方式是变化的, 如晚中生代—早新生代时期, 影响青藏高原演化的主因应首推印度板块和欧亚板块的碰撞及印

度板块向欧亚板块的强烈俯冲作用, 但随着陆内俯冲作用的持续进行, 在欧亚板块内部的应力、应变状态将发生重大转变。晚白垩世—始新世林芝宗组火山岩岩石地球化学特征反映的冈底斯板块由早期的挤压状态向拉张状态的转化^①提供了“板块俯冲→隆升过程”(也可将其视作一个“构造旋回”)中应力、应变状态转化的重要信息。应力、应变状态的转变, 又势必影响到其他地质作用的进程。青藏高原是由经历了多次板块会聚、碰撞作用, 拼合而成的巨型复合造山体, 其实, 每一次板块会聚、拼合作用, 都伴随有“挤压→拉张”状态的转化, 因此, 在研究青藏高原构造演化过程中, 将构造的主因视作一成不变, 并不能反映真实的深部作用过程, 也未必有

收稿日期: 2005-11-28; 改回日期: 2006-02-14

基金项目: 国土资源部科技项目(2000101)资助。

作者简介: 崔军文, 男, 1938 年生, 研究员, 长期从事构造地质和变形动力学研究; E-mail: cuijunwen@ccsd.org.cn。

① 莫宜学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 青藏高原新生代钾质火山作用的时空迁移及其地球动力学意义, 2003.

利于对青藏高原隆升机制和动力学过程的深入探讨。因此,在错综复杂的变形构造图像中,构造研究的首要任务就是要分辨出何时,哪些是影响和制约青藏高原构造演化和隆升的基本或主要构造因素,哪些是次要因素。

尽管青藏高原具有复杂的变形构造图像,但随着研究的不断深入,人们发现在同一地质体(块体或地体)内部,各种构造形迹在成因上具有密切的相关性,相邻地块的构造变形又显示受控于地块结合带(地块边界)的构造演化和动力学过程。如位于雅鲁藏布江断裂南、北两侧的喜马拉雅地块和冈底斯—念青唐古拉地块,两者新生代以来的构造演化明显与沿雅鲁藏布江断裂带的陆内俯冲作用相关。这就表明,青藏高原陆表面发育的各种构造形迹可以用统一的动力学机制加以解释,即可以纳入统一的地球动力学系统。

就青藏高原隆升的“动力学建模”而言,最重要的应当是首先把握住青藏高原现今的宏观构造变形特征。

1 青藏高原形成的构造背景

素有地球第三极之称的青藏高原,就地体观点而言,是由来自塔里木—中朝板块的北昆仑—阿尔金—祁连山地体,华南—东南亚板块的南昆仑地体、可可西里—巴颜喀拉地体和冈瓦纳古陆的羌塘地体、冈底斯地体及喜马拉雅地体等3大板块(或古陆)的6个地体经多次裂解、会聚和陆内俯冲作用拼合而成的巨型“会聚—陆内俯冲型”岩石圈构造块体。这一独特块体的形成可划分为两大阶段:晚白垩世新特提斯洋盆闭合前青藏古陆形成阶段和晚白垩世后青藏高原形成(隆升)阶段。前者通过上述6个地体不断向北漂移,依次在早古生代末、晚古生代—早三叠世、中—晚三叠世、晚侏罗世—早白垩世和晚白垩世时期向北俯冲,南北两地体相互碰撞、会聚,逐次拼合完成^[1-10]。而高原的形成是在挤压—伸展、平移—旋转、陆内俯冲—热隆扩展等复杂的构造应力场中完成。

2 青藏高原的构造分区

岩石圈构造分区主要应考虑:①构造块体的地质特征,同一块体内部应具有大致相同的地质构造演化历史和地球动力学系统,与相邻构造块体的运动学、动力学和岩石圈三维结构有明显区别;②块体边界的运动学和动力学特征,块体边界具有不同于块体内部,并对两侧块体的构造演化和岩石圈结构具有明显的制约作用,是重要的现今地球动力学边界。

2.1 青藏岩石圈块体的划分

假如把青藏高原视为一级构造单元(青藏岩石圈块体),根据其内部的结构和动力学系统,可进一步划分为喜马拉雅地块、藏北地块、青南地块和昆仑—阿尔金—祁连地块等4个二级构造单元(地块)和8个三级构造单元(地体)(图1)。现将青藏高原一、二级构造单元的主要地质特征简述如下。

2.1.1 喜马拉雅地块

位于青藏高原南段的喜马拉雅地块,地质上也称喜马拉

雅前陆,其南界为青藏高原南缘结合带,北界为雅鲁藏布江结合带(图1)。它在构造上又可划分为高喜马拉雅地体和北喜马拉雅地体2个三级构造单元,前者主要出露前寒武纪结晶岩,属印度地台北缘结晶基底。北喜马拉雅地体地表出露的主要为显生宙沉积岩,属印度地台沉积盖层,为一套连续沉积的、稳定的台型碳酸盐岩—碎屑岩沉积。高喜马拉雅地体和北喜马拉雅地体分别以发育近东西走向、向南南西方向逆冲的冲断裂、线形褶皱及逆冲叠覆岩片和近东西走向、向北北东方向斜滑的正断裂及滑覆岩片(图1~2)为特征。高喜马拉雅结晶岩系顶部发育有平行构造带走向的新生代碰撞型花岗岩^[11],北喜马拉雅地体中部出露有拉轨岗日—康马岛链状变质核杂岩带^[23-24]。

2.1.2 藏北地块

位于雅鲁藏布江结合带以北、西金乌拉—金沙江结合带以南的藏北地块,大致以班公湖—怒江断裂为界,划分为冈底斯—念青唐古拉地体和羌塘地体2个三级构造单元(图1)。藏北地体出露的最老地层为古元古界,其原岩成分、时代和同位素地球化学等特征显示它与喜马拉雅块体的古元古界基本能对比,说明藏北地块和喜马拉雅地块都来自同一古陆(冈瓦纳古陆)。古生代时期藏北地块基本上属于冈瓦纳大陆北部的陆缘海域,侏罗纪开始,南缘的冈底斯—念青唐古拉地体由稳定的台型沉积构造环境逐渐转化为活动大陆边缘弧构造环境,其北部属弧后盆地,早—中侏罗世羌北出现中酸性火山喷发,白垩纪—第四纪全区以发育陆相山间盆地和断陷盆地沉积及强烈火山喷发为特征。构造上,藏北地块总体呈现以下元古界为核、轴向近东西的不对称复式褶皱及与其平行的斜冲断裂、北东向和北西向共轭走滑断裂、近于南北向的断陷带为特征(图2~3)。从共轭走滑断裂系普遍切割东西向构造和南北向断陷带普遍切割共轭走滑断裂系及断陷带中一般接受上新世以来沉积,表明前者主要出现在新生代时期,而南北向断陷带则是上新世以来的产物。

2.1.3 青南地块

本文将西金乌拉—金沙江结合带、中昆仑结合带和青藏高原东缘结合带所围限的“三角形”地块统称为青南地块。按动力学特征,可划分为可可西里—巴颜喀拉地体和松潘—甘孜地体2个三级构造单元,两者大致以南昆仑—鲜水河断裂为界(图1)。后者广泛分布有巨厚的上三叠统深水相复理石建造,构造上以发育向南逆冲、推覆的北向弧形逆冲断裂及弧形逆冲叠覆岩片为特征^[12]。可可西里—巴颜喀拉地体,主要出露晚三叠世火山岩和活动型沉积建造,构造上,以平行构造带走向的大型纵向左行走滑断裂为主(图3)。青南地块的西段,被阿尔金断裂切割,越过阿尔金断裂,推测西昆仑构造带的甜水海地体和喀拉塔格地体分别对应于可可西里—巴颜喀拉地体和松潘—甘孜地体,前两者的边界断裂为泉水沟断裂(图1,3)。

青南地块的前震旦系变质基底,零星出露于地块东缘。

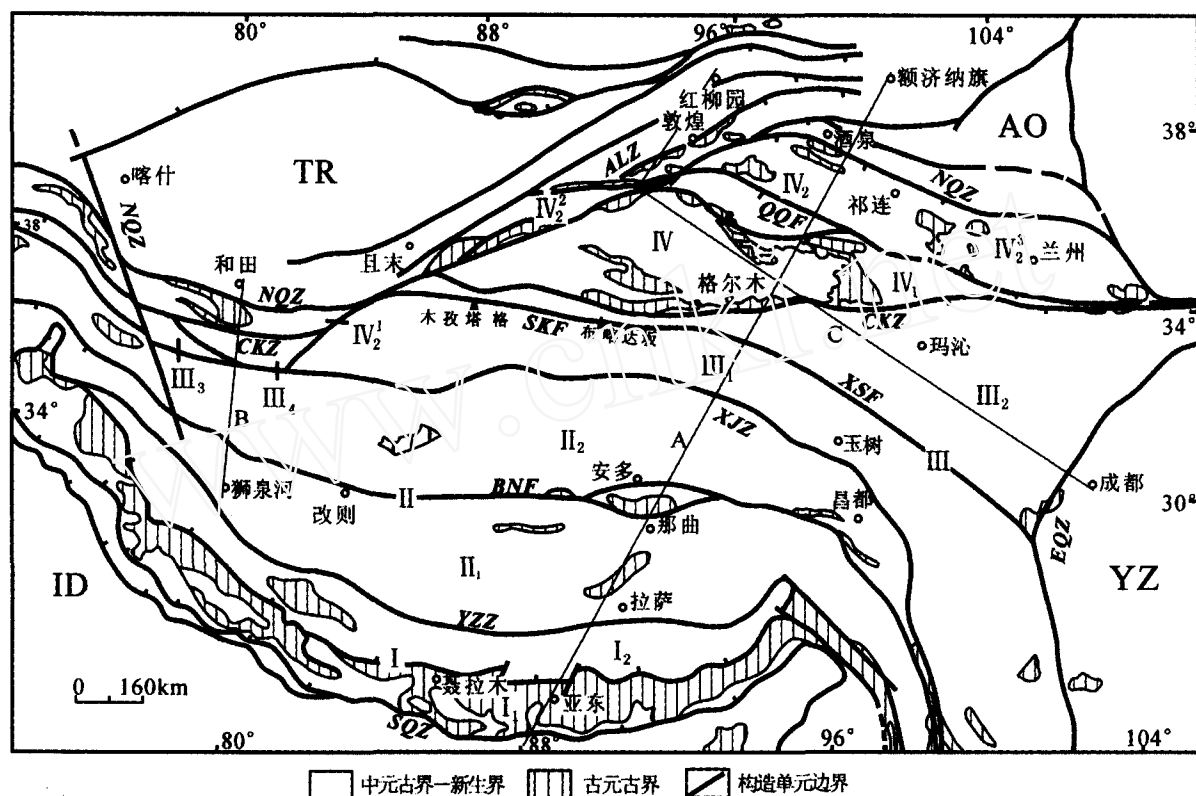


图1 青藏岩石圈块体构造分区简图(据[11~20]编制)

I—喜马拉雅地块; I₁—高喜马拉雅地体, I₂—北(特提斯)喜马拉雅地体; II—藏北地块; II₁—冈底斯—念青唐古拉地体, II₂—羌塘—昌都地体; III—青南地块; III₁—可可西里—巴颜喀拉地体, III₂—松潘—甘孜地体, III₃—甜水海地体, III₄—喀拉塔格地体; IV—北昆仑—阿尔金—祁连地块; IV₁—东昆仑—柴达木地体, IV₂—西昆仑—阿尔金—祁连地体, IV₂¹—西昆仑地体, IV₂²—阿尔金地体, IV₂³—祁连地体. SQZ—青藏高原南缘结合带; YZZ—雅鲁藏布江结合带; BNF—班公湖—怒江断裂; XJZ—西金乌拉—金沙江结合带; XSF—鲜水河断裂; SKF—南昆仑断裂; CKZ—中昆仑结合带; QQZ—南祁连—柴达木北缘断裂; NQZ—青藏高原北缘结合带; EQZ—青藏高原东缘结合带; ALZ—阿尔金转换带; TR—塔里木地块; AO—阿拉善—鄂尔多斯地块; YZ—扬子地块; ID—印度地块; A—亚东—额济纳旗构造剖面; B—噶尔(狮泉河)—和田构造剖面; C—成都—红柳园构造剖面

Fig.1 Tectonic divisions of the Qinghai-Tibet lithospheric block (Compiled mainly according to [11 - 20])

I-Himalaya block; I₁-Higher Himalaya terrane; I₂-North(Tethys)-Himalaya terrane; II-Northern Tibet block; II₁-Gangdisse-Nyainqêtanglha terrane; II₂-Qiangtang-Qamdo terrane; III-Southern Qinghai block; III₁-Hoh Xil-Bayan Har terrane; III₂-Songpan-Garzê terrane; III₃-Tianshuihai terrane; III₄-Karatax terrane; IV-North Kunlun-Altyr Tagh-Qilian block; IV₁-East Kunlun-Qaidam terrane; IV₂-West Kunlun-Altyr Tagh-Qilian terrane, IV₂¹-West Kunlun terrane, IV₂²-Altyr Tagh terrane, IV₂³-Qilian terrane. SQZ-South Qinghai-Tibet Plateau marginal junction zone; YZZ-Yarlung Zangbo junction zone; BNF-Bangong Co-Nujiang fault; XJZ-Xijir Ulan-Jinsha River junction zone; XSF-Xianshuihe fault; SKF-South Kunlun fault; CKZ-Central Kunlun junction zone; QQZ-South Qilian-north Qaidam marginal fault; NQZ-North Qinghai-Tibet Plateau marginal junction zone; EQZ-East Qinghai-Tibet Plateau marginal junction zone; ALZ-Altyr Tagh transform zone. TR-Tarim lithospheric block; AO-Absa-Ordos lithospheric block; YZ-Yangtze lithospheric block; ID-Indus lithospheric block. A-Tectonic section from Yadong to Ejina; B-Tectonic section from Gar (Shiquanhe) to Hotan; C-Tectonic section from Chengdu to Hongliuyuan

古生代时期,基本处于稳定的沉积构造环境,至石炭—二叠纪,阿尼玛卿山和康滇古陆两侧出现活动型沉积。东、西昆仑南带的晚古生代沉积相,与西秦岭地区基本一致,属于同一沉积构造域^[10]。青南地块的新生代地层全为陆相山间盆地沉积,中新世,可可西里—巴颜喀拉地体有强烈碱性火山喷溢^[25-27]。

2.1.4 北昆仑—阿尔金—祁连地块(KAQ)

北昆仑—阿尔金—祁连地块以青藏高原北缘结合带与塔里木—阿拉善—鄂尔多斯地块相隔,以中昆仑结合带与青南地块为界。按其动力学特征可划分为东昆仑—柴达木地体和西昆仑—阿尔金—祁连地体2个二级构造单元(图1)。

东昆仑—柴达木地体构造上以一系列向北突出的弧形

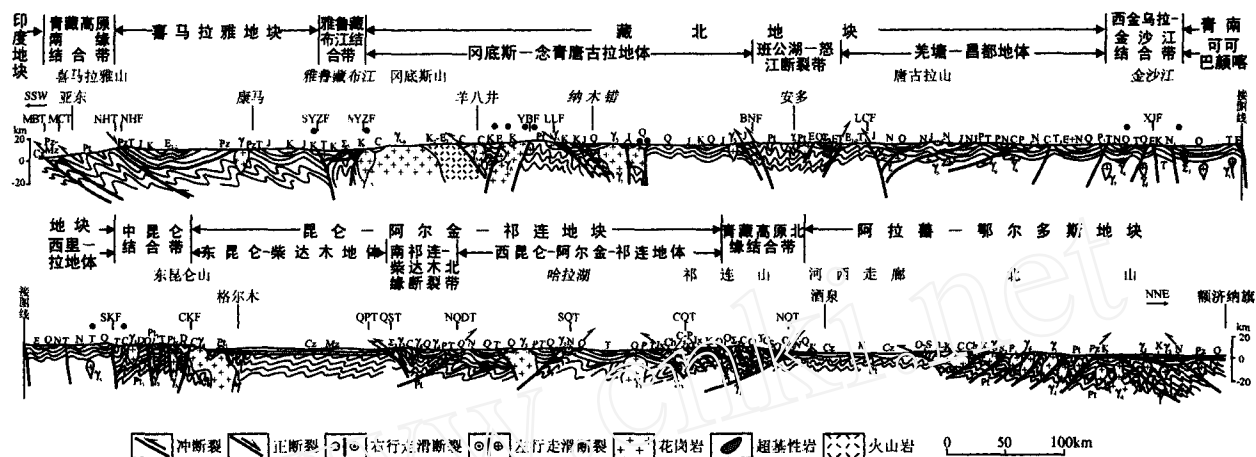


图2 北北东向横穿青藏岩石圈块体的亚东—额济纳旗构造剖面(据参考文献[2,6,12,14,17~18,21]编制,剖面位置见图1中A)

MBT—主边界冲断裂;MCT—主中央冲断裂;NHT—北喜马拉雅冲断裂;NHF—北喜马拉雅正断裂;SYZF—雅鲁藏布江南缘断裂;
NYZF—雅鲁藏布江北缘断裂;YBF—羊八井断裂;LLF—隆格尔—嘉黎断裂;BNF—班公湖—怒江断裂;LCF—澜沧江断裂;
XJF—西金乌兰—金沙江断裂;SKF—南昆仑断裂;CKF—中昆仑断裂;QPT—柴达木山前冲断裂;QST—柴达木—沙柳河冲断裂;
NQDT—柴达木北缘冲断裂;SQT—南祁连山冲断裂;CQT—中祁连山冲断裂;NQT—北祁连山冲断裂

Fig.2 NNE-trending Yadong-Ejin tectonic section traversing the Qinghai-Tibet lithospheric block (compiled mainly according to [2, 6, 12, 14, 17-18, 21]; for the location of the section, see Fig. 1-A)

MBT—Main boundary thrust; MCT—Main Central thrust; NHT—North Himalaya thrust; NHF—North Himalaya normal fault; SYZF—South Yarlung Zangbo marginal fault; NYZF—North Yarlung Zangbo marginal fault; YBF—Yangbajain fault; LLF—Lunggar-Lhari fault; BNF—Bangong Co-Nujiang fault; LCF—Lancang River fault; XJF—Xijir Ulan-Jinsha River fault; SKF—South Kunlun fault; CKF—Central Kunlun fault; QPT—Qaidam piedmont thrust; QST—Qaidam-Shaliuhe thrust; NQDT—North Qaidam marginal thrust; SQT—South Qilian thrust; CQT—Central Qilian thrust; NQT—North Qilian thrust

逆冲断裂和盆地相间组成的盆-山构造为基本特征, 冲断裂总体呈北西西—东西走向(图3), 向南倾斜, 中等倾角, 延深收敛于壳内拆离层。因此, 东昆仑—柴达木地体, 上地壳部分实际上是由一系列逆冲岩片堆叠而成的构造叠覆体(图3)。逆冲断裂系起始于古生代末, 强烈活动时期在中、新生代, 特别是上新世—第四纪时期, 不同程度地包容有早古生代蛇绿混杂岩、岛弧型花岗岩和中-高压变质岩, 可见, 逆冲断裂系的主体很有可能是晚古生代以来被移置的早古生代板块碰撞带的成分^[10, 28-29]。西昆仑—阿尔金—祁连地体, 由于阿尔金左行走滑断裂的逐次错断被分成3段, 自西向东依次为: 西昆仑地体、阿尔金地体和祁连地体, 三者的南界断裂依次为奥依塔格—库地—喀什塔什断裂、阿尔金断裂和南祁连—柴达木北缘断裂(图1), 即西昆仑地体直接与喀拉塔格地体和甜水海地体相接, 说明西昆仑造山带中不存在与东昆仑—柴达木地体主体相对应的构造成分(盆-山构造)。祁连地体具有类似于东昆仑—柴达木地体的盆-山构造格局和断裂运动学, 但与东昆仑—柴达木地体的盆-山构造相比, 除中

祁连地区盆地略具近似的等轴形态外, 主要盆地和山体均以线性为主, 平面上呈左行斜列, 显示盆-山构造以挤压和剪切作用为主的成因特点。阿尔金地体已完全包容在阿尔金转换带中, 在早古生代时期与祁连地体完全能对比^[28-29]。西昆仑地体具有类似东昆仑—祁连地体的前中生代构造演化历史和物质组成, 可见三者在早古生代时期是连为一体的, 由于晚古生代以来东昆仑—祁连地体的北东向逆冲扩展和中生代以来阿尔金断裂的强烈左行走滑, 祁连地体、阿尔金地体相对西昆仑地体依次往北东方向平移了1000km和400km^[29]。

2.2 青藏岩石圈块体构造单元边界的主要变形特征

由于青藏高原的隆升是新生代以来的地质事件, 因此青藏高原构造单元边界的确定, 除考虑两侧地质体构造演化和岩石圈三维结构特征的差异外, 重点应考虑新生代以来, 它对两侧地块岩石圈三维结构形成的制约作用。按其演化, 特别是中—新生代以来的构造演化、现今构造活动性和规模, 青藏块体至少可区分出一级、二级和三级等3个不同级别的断裂构造系统, 它们分别构成一、二、三级构造单元的边界

① 李海兵. 阿尔金断裂带的形成时代及其走滑作用对青藏高原北部隆升的贡献(博士论文), 2001.

(图1、3)。构造单元边界的确定,前人一般以地质资料,特别是大型断裂的分布作为主要依据,但是众多事实表明,与深部地球物理场相对应的一、二级构造单元边界,在地表并非某一断裂,而是断裂带,特别是常伴有线形盆-山构造的发育,因此本文将“块体”和“地块”间具有一定规模和宽度、并包含有线形盆地和山系的构造带,分别谓“结合带”和“断裂带”,它不同于传统概念上的一、二级构造单元的边界断裂,三级或更低级别构造单元的边界断裂称断裂。一般来说,结合带和断裂带,与其两侧地块的运动学和动力学特征有明显

区别,是重要的地球动力学边界。

现将青藏块体结合带的主要变形构造特征,自南而北依次简述如下。

2.2.1 青藏高原南缘结合带(SQZ)

由喜马拉雅山前逆冲断裂系和西瓦里克坳陷带组成的青藏高原南缘结合带构成青藏块体与印度地台的边界。组成喜马拉雅山前逆冲断裂系的主要冲断裂有:北喜马拉雅高温韧性推覆剪切带(NHT)、主中央冲断裂(MCT)、主边界冲断裂(MBT)(图2)、主前缘冲断裂(MET)、东西瓦里克冲断裂

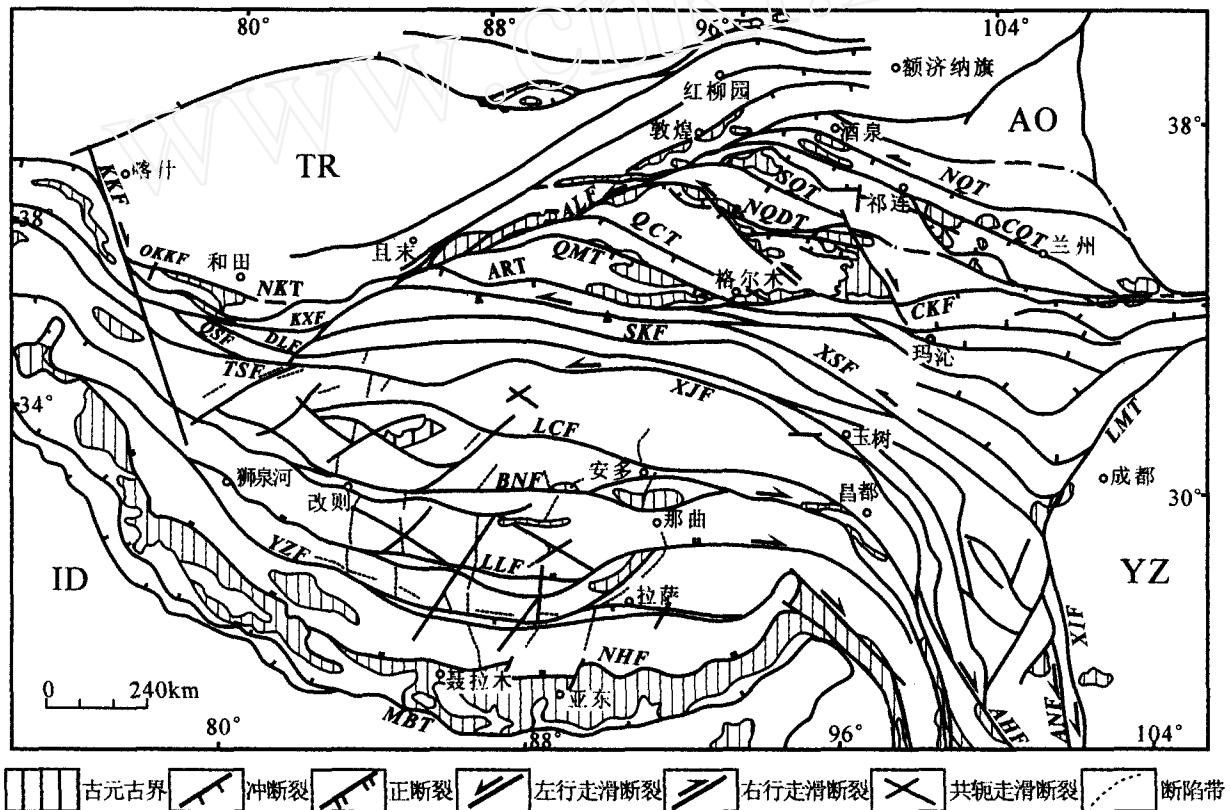


图3 青藏块体主要断裂构造简图(据参考文献[11~20, 30~31]编制)

MBT—主边界冲断裂;NHF—北喜马拉雅正断裂;YZF—雅鲁藏布江断裂;LLF—隆格尔—嘉黎断裂;BNF—班公湖—怒江断裂;LCF—澜沧江断裂;XJF—西金岛—金沙江断裂;SKF—南昆仑断裂;CKF—中昆仑断裂;ART—阿尔喀冲断裂;QMT—祁漫塔格冲断裂;QCT—柴中冲断裂;NQDT—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;LMT—龙南山冲断裂;XSF—鲜水河断裂;XIF—小江断裂;ANF—安宁河断裂;AHF—哀牢山—红河断裂;ALF—阿尔金断裂;KKF—喀喇昆仑断裂;TSF—甜水海断裂;QSF—泉水沟断裂;DLF—大红柳滩断裂;KXF—康西瓦断裂(西西南断裂);OKKF—奥依塔格—库地—喀什塔什断裂(西昆中断裂);

NKT—西西北冲断裂;TR—塔里木地块;AO—阿拉善—鄂尔多斯地块;YZ—扬子地块;ID—印度地块

Fig. 3. Major faults in the Qinghai-Tibet lithospheric block (compiled mainly according to [11~20, 30~31])

MBT—Main boundary thrust; NHF—North Himalaya normal fault; YZF—Yarlung Zangbo fault; LLF—Lunggar-Lhari fault; BNF—Bangong Co-Nujiang fault; LCF—Lancang River fault; XJF—Xijiang Ulan-Jinsha River fault; SKF—South Kunlun fault; CKF—Central Kunlun fault; ART—Arka thrust; QMT—Qimantage thrust; QCT—Central Qaidam thrust; NQDT—North Qaidam marginal thrust; SQT—South Qilian thrust; CQT—Central Qilian thrust; NQT—North Qilian thrust; LMT—Longmenshan thrust; XSF—Xianshuihe fault; XIF—Xiaojiang fault; ANF—Anninghe fault; AHF—Ailaoshan-Honghe fault; ALF—Altyn Tagh fault; KKF—Karakorum fault; TSF—Tianshuihai fault; QSF—Quanshuigou fault; DLF—Dahongliutan fault; KXF—Kangxiwar fault (South West Kunlun fault); OKKF—Oytage-Küda-Kaxtax fault (Central West Kunlun fault); NKT—North west Kunlun thrust; TR—Tarim lithospheric block; AO—Alxa-Ordos lithospheric block; YZ—Yangtze lithospheric block; ID—Indus lithospheric block

(MHT)等^[7,23,25,32-35]。北喜马拉雅高温韧性推覆剪切带(NHT)和主中央冲断裂(MCT)分别位于高喜马拉雅结晶岩系顶、底部,前者是青藏高原地学断面(GGT)研究中首次厘定的一条大型深层韧性剪切带,也是喜马拉雅山前逆冲断裂系中起始最早的一条冲断裂,新近的反射地震资料表明其存在无疑^[24]。NHT是MCT的深部变形相,前者的变质相达高温角闪岩相^[3],局部出露有高压榴辉岩,按榴辉岩的地表出露点位置推测,NHT和MMT(主幔冲断裂)^[23]应属于同一条断裂。NHT和MCT的主要形成时期分别为晚始新世—中新世和晚渐新世—中新世。主边界冲断裂(MBT)、主前锋冲断裂(MFT)和主西瓦里克冲断层(MHT)发育在喜马拉雅前陆磨拉石盆地中,浅变质的古生界沉积岩系向南推覆在中中新—上新统下西瓦里克群之上(MBT),下西瓦里克群推覆在上上新—更新统的中—上西瓦里克群之上(MFT),中—上西瓦里克群推覆在中更新统一第四系沉积层上(MHT)。MBT、MFT和MHT的起始时代,依次为晚上新世、晚更新世和全新世^[23,32-35]。

2.2.2 雅鲁藏布江结合带(YZZ)

喜马拉雅地块与冈底斯—念青唐古拉地块间由一系列经历了强构造变形,并包容有蛇绿岩、高压变质岩和混杂堆积等大量与新特提斯洋扩张和印度板块与欧亚板块汇聚、碰撞相关的岩石构造单元的巨型构造带,称雅鲁藏布江结合带(图1)。

雅鲁藏布江结合带在南北方向可以划分为3部分:①中部直立变形带:大致位于结合带中央的蛇绿岩套及其两侧的沉积岩、变质岩和花岗岩中,发育近于东西走向、直立的面状构造和线状构造;②南缘北倾逆冲叠覆带:位于中央直立变形带以南,构造上以向南逆冲、推覆的冲断裂和向南倒转的褶皱所组成的构造叠覆作用为特征,主要发育在蛇绿岩套以南的高压变质岩、古近—新近纪磨拉石和上三叠统分布区,其主体为雅鲁藏布江南缘冲断裂;③北缘南倾逆冲叠覆带:位于中央直立流劈理带以北,主要分布在雅鲁藏布江蛇绿岩带北侧的古近—新近纪磨拉石盆地和冈底斯岩带南缘,其主体为雅鲁藏布江北缘冲断裂(图2~3)。可见,雅鲁藏布江结合带在南北向剖面中呈不对称的扇形(图2),形成于岩石圈不同构造层次的蛇绿岩、花岗麻岩和E₁₋₂磨拉石,发育同向的直立面状构造和线状构造,这一事实表明在雅鲁藏布江结合带,特别是结合带中部的变形带具有自深部(至少在下地壳)至地壳表层相一致的运动学特征,即自下而上的垂直伸展运动,贯穿于整个地壳,甚至达岩石圈地幔或上地幔^[23]。迄今为止的同位素年龄资料表明直立变形带和北倾的逆冲断裂起始时代为白垩纪,而南倾的逆冲断裂则是上新世以来的变形事件^[7,23,35]。按直立变形带两侧出露的超基性岩体估算的雅鲁藏布江南缘冲断裂和雅鲁藏布江北缘冲断裂中新世以来的最大推覆距离分别为90km和5km。

2.2.3 西金乌拉—金沙江结合带(XJZ)

位于藏北地块与青南地块间的西金乌拉—金沙江结合

带,遥感影像和深部地球物理场^[2,36-38]表现极为清晰。断裂带自西向东,由东西走向逐渐转为北西向—南东向,往西,推测与西昆仑甜水海断裂相连,更西与喀喇昆仑断裂斜接(图1)。西金乌拉—金沙江结合带从三叠纪,特别是晚三叠世开始就是青藏高原的一条重要构造单元边界,它既是地质历史时期冈瓦纳古陆与扬子古陆的分界,又是中、晚三叠世羌塘—昌都板块与扬子板块碰撞的会聚板块边界^[39]和晚近时期青藏高原的重要的动力学边界。

西金乌拉—金沙江结合带由一系列走向大致平行的断裂组成,在垂直断裂带走向的剖面中,呈相向倾斜的扇形,主断裂为西金乌拉—金沙江断裂,总体向北—北东方向倾斜,倾角40°~70°(图2),其下盘断续发育平行断裂带走向的新生代盆地。断裂带西段,主断裂由多条北倾的叠瓦状逆冲断裂组成,晚古生代—早中生代蛇绿混杂岩、上三叠统复理石逐次向南逆冲在中新世盆地和侏罗系上,反向倾斜的冲断裂见于可可西里地区。两者在剖面上呈不对称的扇形,其核部出露有来自深部的超镁铁岩和兰闪石化变基性岩^[40],可可西里地区分布有中新世平顶山组碱性玄武岩和安山岩(K-Ar年龄9.4Ma)。反映在晚中新世时期,金沙江结合带发生了自下而上的垂直伸展作用,并导致垂直结合带方向的水平拉张和反向逆冲。北倾逆冲断裂带中(222.5~272±7)Ma的青铝闪石片岩^[41]的发现,表明金沙江结合带是在三叠纪古特提斯洋闭合,青南板块和扬子板块会聚、碰撞带基础上发育起来的。

2.2.4 中昆仑结合带(KZ)

中昆仑结合带由东昆仑结合带和西昆仑结合带两部分组成,前者构成东昆仑—柴达木地体和可可西里—巴颜喀拉地体的边界,后者则为西昆仑地体和喀拉塔格地体、甜水海地体的边界(图1)。

东昆仑结合带是在古生代扬子板块与北中国板块拼合带基础上发育起来的、具有长期活动性的构造带^[40,42]。在青海境内,东昆仑结合带的主断裂(中昆仑断裂)位于古元古代变质基底、花岗岩与新元古代—晚古生代火山岩带间,向北高角度倾斜,其南界断裂为南昆仑断裂(晚古生代蛇绿混杂岩带南界)(图3)。断裂带内广泛发育与早期洋—陆俯冲带倾向一致、总体向北倾斜的叠瓦状逆冲断裂,横穿阿尔金山的CT剖面^[43]显示组成东昆仑结合带的叠瓦状逆冲断裂系已扩展到东昆仑—柴达木地体,可见东昆仑断裂带可作为东昆仑—柴达木地体逆冲断裂系的根带(图2)。东昆仑断裂带越过布尔汗布达山,似乎有分二支的趋势,一支继续呈东西向延伸,潜没于共和盆地,往东,推测与西秦岭的武山—天水断裂和唐藏—商南断裂相连;另一支,往南东延伸,经布青山,终止于阿尼玛卿山(玛沁)。东昆仑断裂带的东段,在垂直构造带走向的北东向剖面中呈扇形。

西昆仑结合带在平面上的分带,由于垂直构造带方向的强烈南北向挤压,而不很清晰,但西昆仑北带北西—东西走向的古生代蛇绿混杂岩及其相伴随的晚古生代—早中生

代花岗岩^[5,41],可作为西昆中断裂带存在的标志,其主断裂为奥依塔格—库地—喀什塔什断裂,其南界为康西瓦断裂(图4),两者分别对应东昆仑的中昆仑断裂和南昆仑断裂。奥依塔格—库地—喀什塔什断裂和康西瓦断裂均为近于直立、微向南倾斜,其北为一列向南中等—高角度倾斜的逆冲断裂(图4)。深部资料^[38,41~42]同样显示西昆中断裂带是制约西昆北逆冲断裂系和塔里木盆地南缘盆—山结合部位构造演化的主因。

2.2.5 青藏高原北缘结合带(NQE)

青藏高原北缘,西起帕米尔,往东经喀喇昆仑、阿尔金山、祁连山,至北秦岭,存在一系列逆冲—走滑断裂、线形褶皱和山前拗陷带,它们共同构成了青藏高原与塔里木—华北地块的边界,在平面上总体呈北西西向“S”形,可谓青藏高原北缘结合带(图1)。按其地质特征可分解为4段:西段帕米尔—喀喇昆仑弧形结合带、中西段西昆仑北结合带、中东段阿尔金转换带、东段北阿尔金—北祁连结合带。其中以北祁连结合带地质特征最为清晰,最具代表性。

2.2.5.1 阿尔金—北祁连结合带

笔者将阿尔金山和祁连山北缘的一系列北西西向—东西向的逆冲断裂系、新太古—古元古代结晶岩系、早古生代蛇绿岩混杂岩和不同时代花岗岩等岩石构造单元统归北阿尔金—北祁连结合带,按其走向可划分为两段:西段的北阿尔金结合带和东段的北祁连结合带(图1),前者属后者的西延,两者具有大致相同的构造特征。以北祁连结合带为例,北祁连结合带由北祁连逆冲断裂系和祁连山前拗陷带(走廊拗陷带)组成,其北侧属华北地台的鄂尔多斯地块,南侧为祁连地块。北祁连结合带的南界断裂为中祁连冲断裂(昌马断裂),在剖面上呈扇形(图2)。北祁连逆冲断裂系由一系列起始时代

为三叠纪,但在新生代,特别是上新世以来具强烈活动的走向北西西,倾向南西,倾角 60° 左右的逆冲断裂组成,主断裂为北祁连冲断裂,以出露早古生代蛇绿混杂岩为标志^[4]。反射地震资料^[4]显示逆冲断裂在剖面上具上叠式组合,位于其下盘的新生代盆地属压性盆地(图2)。北祁连逆冲断裂系的运动学,除显示自南而北的逆冲扩展作用外,还伴随有左行走滑作用,即阿尔金—祁连地块相对鄂尔多斯地块作自南西往北东方向的斜冲^[38,43]。

2.2.5.2 阿尔金转换带

东昆仑—祁连地块和西昆仑—塔里木地块间一系列北东东向断裂及其间盆地组成的阿尔金构造带,是一条典型的与岩石圈构造转换作用相关的转换带,其主体阿尔金断裂属转换型走滑断裂^[29,44]。其间包容近东西向的逆冲断裂,属北祁连结合带内逆冲断裂系的西延。由于东昆仑—祁连地块向北东方向的强烈逆冲扩展和阿尔金断裂带的左行走滑作用,造成青藏高原北缘结合带的阶状错落。

2.2.5.3 西昆仑北结合带和帕米尔—喀喇昆仑结合带

由西昆仑山前逆冲断裂系和喀喇昆仑山前逆冲断裂系及相应的山前拗陷带组成的西昆仑北结合带和帕米尔—喀喇昆仑结合带(图1),在结合带组成、构造形态、活动时期和动力学特征等方面与北阿尔金—北祁连结合带十分相似。主要区别仅在于前者的逆冲断裂系倾角较陡,山间盆地不发育,构造的线性和挤压特征更为清晰,帕米尔—喀喇昆仑结合带的逆冲断裂大多还伴有右行走滑性质^[41,45],而北阿尔金—北祁连结合带内的逆冲断裂大多伴有左行走滑性质(图3)。西昆仑和喀喇昆仑山前拗陷带厚达1万余米的中、新生代沉积,表明在西昆仑至喀喇昆仑山前,自中生代以来一直处于急剧的沉降状态。

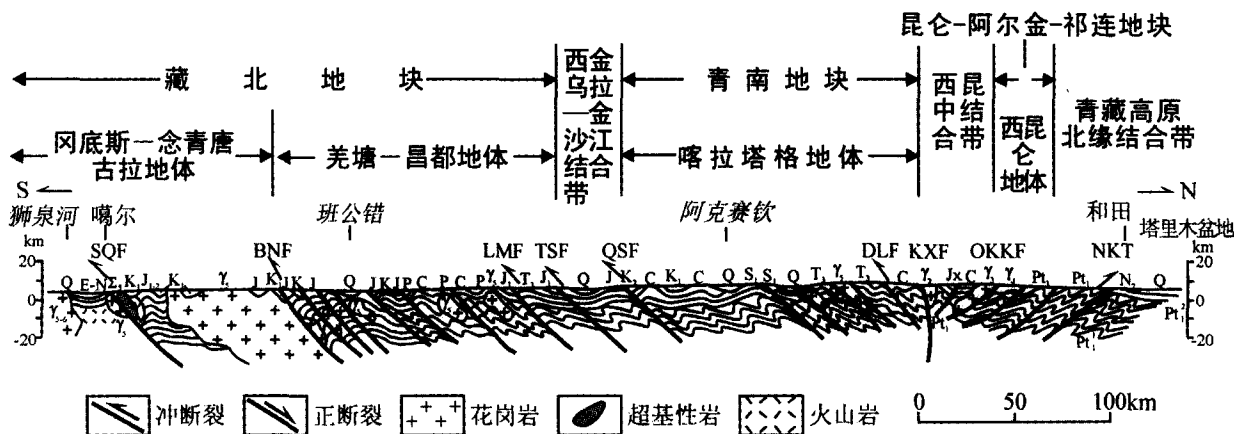


图4 青藏高原噶尔(狮泉河)—和田构造剖面图(据参考文献[18~19]编制,剖面位置见图1B)

SQF—狮泉河断裂;BNF—班公湖—怒江断裂;LMF—龙木错断裂;TSF—甜水海断裂;QSF—泉水沟断裂;DLF—大红柳滩断裂;
KXF—康西瓦断裂;OKKF—奥依塔格—库地—喀什塔什断裂;NKF—西昆北冲断裂

Fig.4 Tectonic section from Gar (Shiquanhe) to Hotan on the Qinghai-Tibet Plateau (Compiled mainly according to [18~19]; for the location of the section, see of Fig. 1 B)

SQF—Shiquanhe fault; BNF—Bangong Co—Nujiang fault; LMF—Lungmu Co fault; TSF—Tianshuihai fault; QSF—Quanshuigou fault; DLF—Dahongliutan fault; KXF—Kangxiwar fault; OKKF—Oytag—Kiida—Kaxtax fault; NKF—North west Kunlun thrust

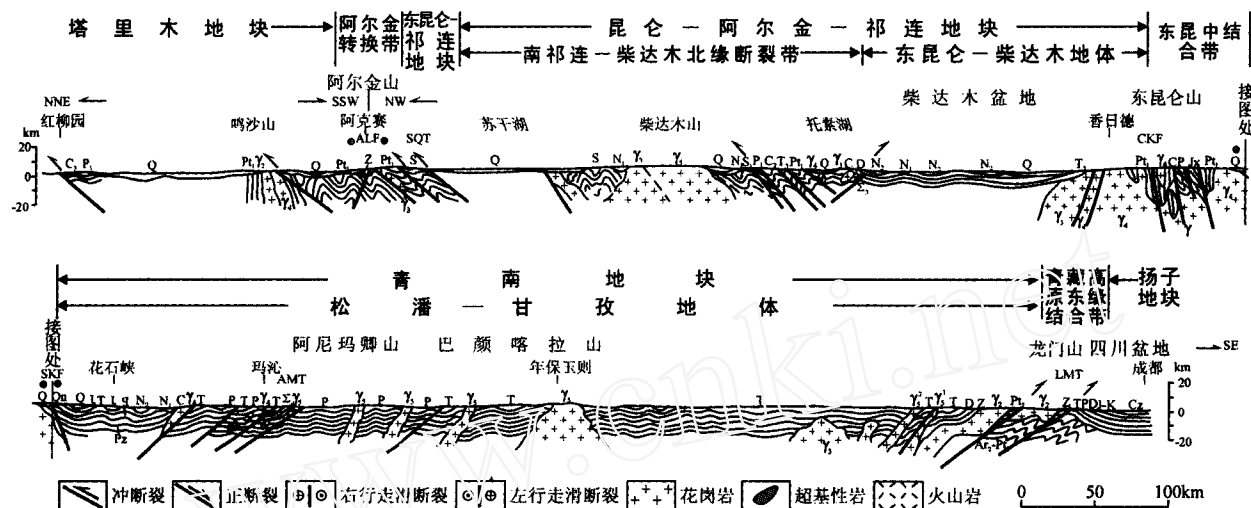


图5 青藏高原成都—红柳园构造剖面图(据参考文献[11,12 14, 17, 20]编制,剖面位置见图1C)

LMT—龙门山冲断裂;AMT—阿尼玛卿断裂;SKF—南昆仑断裂;CKF—中昆仑断裂;

NQDT—柴达木北缘冲断裂;SQT—南祁连冲断裂;ALF—阿尔金断裂

Fig. 5. Tectonic section from Chengdu to Hongliuyuan on the Qinghai-Tibet Plateau

(compiled mainly according to [11,12 14, 17, 20]); for the location of the section, see of Fig. 1C).

LMT—Longmenshan thrust; AMT—A'nyemaqên fault; SKF—South Kunlun fault; CKF—Central Kunlun fault;

NQDT—North Qaidam marginal thrust; SQT—South Qilian thrust; ALF—Altyn Tagh thrust

2.2.6 青藏高原东缘结合带(EQZ)

青藏高原东缘结合带构成青藏高原与扬子地块的构造边界,结合带总体呈北北东—南南西向,按其走向可划分为东缘北结合带和东缘南结合带两部分(图1)。

东缘北结合带的主体为龙门山逆冲断裂系,它是一条起始于三叠纪,在新生代时期具有强烈活动性的逆冲断裂系^[46-48]。新生代以来,自北西往南东方向的强烈逆冲(图5),表明在新生代时期,松潘—甘孜地体物质整体向南东方向扩展,这和青藏高原总体的运动学特征一致,也为GPS观测资料所证实^[9]。因此,龙门山逆冲断裂系应作为青藏高原东缘结合带的成分,往南西延伸,应对应小江—安宁河断裂带(图1)。可见,从地球动力学角度分析,传统的“康滇地轴”应作为青藏高原的组成部分。

东缘南结合带包括康滇地轴东缘的小江断裂和安宁河断裂(图3),可统称为小江—安宁河断裂带,总体呈南北走向,往北延伸,分别与龙门山逆冲断裂系和鲜水河断裂斜接,往南延伸,与哀牢山—红河断裂带相交。小江—安宁河断裂带是一条以挤压逆冲、同时伴有左行走滑和局部拉张性质的大型断裂,更新世以来,北段的最大水平走滑速率达11.8mm/a,最大的倾滑运动速率为1.33~1.60mm/a^[39]。小江—安宁河断裂带在地质历史时期就是一条重要的构造边界^[11,19],也是青藏高原东缘的一条重要航磁和重力梯度带及中国西部地区重要的强震活动带^[20,49],GPS资料^[9]显示其两侧的运动学特征有

明显的差异。因此将小江断裂带作为青藏高原东缘的边界,较其西的任何一条断裂带作为青藏高原的东界更合适。

3 结论

通过上述简要分析,可以看出青藏高原的构造具有明显的分块性特点。就现今动力学而言,从宏观上看,青藏块体可划分为喜马拉雅地块、藏北地块、青南地块和昆仑—阿尔金—祁连地块等4个具明显不同动力学特点的地块(二级构造单元),它们又可进一步划分为若干更小一级的、具不同运动学特征的构造单元——地体。地块间以规模较大的断裂带为边界,它们对块体内部的构造演化具有明显的制约作用,而分隔地体的边界断裂一般是由两侧地体的变形运动学差异引起的。

青藏高原的现今四维运动学特征总体上表现为:在印度板块向欧亚板块持续、强烈俯冲和热的、具柔性流变学特征的青藏高原整体向北北东方向移动的区域构造背景基础上,其南、北两侧的喜马拉雅地块、昆仑—阿尔金—祁连地块向冷的、刚性的印度块体和塔里木—阿拉善—鄂尔多斯块体不对称的逆冲叠覆,而位于青藏高原腹部的藏北地块和青南地块,由于青藏高原西缘的强烈南北向挤压^[49]和深部大量低速体的向上涌动(岩浆底辟或热隆伸展作用)^[3,27,29,50-51]导致腹部在整体抬升和陆表面相对凹陷的区域构造背景下,作自西向东不均一的扩展,后者由于金沙江结合带具有最大平移速率^[9],地

块内部以平行构造带走向的左行走滑作用为主,同时伴随有向藏北地块的挤压和逆冲扩展,至东缘由于受到扬子板块的阻挡,仅局部在龙门山地区发生向四川盆地的逆冲扩展作用,主体部分沿三江构造带向川滇地区平移扩展。藏北地块则由于自西向东运动速度的不断加快(据GPS资料^[9],狮泉河的东向运动速率为4.7 mm/a,而东部的索县高达 25.94 ± 1.05 mm/a),在地块内部出现东西向拉张,加之由于青南地块向南西方向的局部挤压作用,导致藏北地块以南北向断陷带及北西和北东向的共轭走滑为主的构造格局。因此,就现今动力学而言,青藏高原在随着时间推移、隆升速度不断加快的同时,还逐渐向外缘的刚性地块扩展,即高原面积在不断增大。因此青藏高原的边界具有扩展性质,按扩展机制可区分两类扩展型动力边界:走滑型扩展边界和逆冲型扩展边界。典型的走滑型扩展边界位于青藏高原北缘的阿尔金山和青藏高原东缘的三江地区,青藏高原南缘的动力边界属典型的逆冲型扩展边界,而位于祁连山和龙门山的动力边界兼有逆冲和走滑双重(斜向)扩展性质。

致谢:工作中得到李廷栋院士、肖序常院士、许志琴院士、袁学诚研究员、肖庆辉研究员、叶天竺研究员和姜枚研究员的支持和帮助,在此致以诚挚谢意!

参考文献(References):

- [1] Patriat P, Achache J. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates [J]. *Nature*, 1984, 311:615~621.
- [2] Wu Gongjian, Xiao Xuchang, Li Tingdong. Yadong to Golmud Transect, Qinghai Tibetan Plateau, China, *Global Geosci. Transect*. 3 AGU[M]. Washington. D. C. 1991.
- [3] 崔军文,朱红,武长得,等. 亚东-格尔木 GGT, 青藏高原岩石圈变形及其动力学[M]. 北京:地质出版社, 1992. 1~165.
Cui Junwen, Zhu Hong, Wu Changde, et al. Yadong-Golmud GGT, Deformation and Dynamics of the Lithosphere in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1~165 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[J]. 地球学报, 1995, 34(1):1~9.
Li Tingdong. The uplifting process and mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1995, 34(1):1~9 (in Chinese with English abstract).
- [5] Ph. Matte P, Tapponnier N, et al. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and Indus[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1996, 142: 311~330.
- [6] Wang Zejiu, Wu Congjian, Xiao Xuchang, et al. Global Geoscience Transect—Golmud Ejin Transect, China [M]. Beijing: China Geological Map Printing House, 1997.
- [7] 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京:地质出版社, 1997. 1~246.
Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Xu Huiwen, et al. Ductile Shear Zones in the Main Continental Mountain Chains of China and Their Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 1~246 (in Chinese).
- [8] 董学斌, 杨惠心, 程立人, 等. 青藏高原地体构造的古地磁研究[M]. 北京:地质出版社, 1998. 1~87.
Dong Xuebin, Yang Huixin, Cheng Liren, et al. Yadong-Golmud GGT—The Paleomagnetic Research of Thrain Tectonic in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 1~87 (in Chinese with English abstract).
- [9] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau[J]. *Science*, 2001, 294 (23), 1671~1677.
- [10] 边千超, 赵大升, 叶正仁, 等. 初论昆祁秦缝合系[J]. 地球学报, 2002, 23(6), 501~508.
Bian Qiantao, Zhao Dasheng, Ye Zhengren, et al. A preliminary study of the Kunlun-Qilian-Qinling suture system[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(6):501~508 (in Chinese with English abstract).
- [11] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1982. 1~730.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional Geology of Sichuan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982. 1~730 (in Chinese with English abstract).
- [12] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989. 1~692.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Regional Geology of Gansu Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. 1~692 (in Chinese with English abstract).
- [13] 陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989. 1~698.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. Regional Geology of Shaanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. 1~698 (in Chinese with English abstract).
- [14] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1991. 1~725.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 1~725 (in Chinese with English abstract).
- [15] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1990. 1~727.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. Regional Geology of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 1~727 (in Chinese with English abstract).
- [16] 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1990. 1~522.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Ningxia Hui Autonomous Region. Regional Geology of Ningxia Hui Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 1~522 (in Chinese with English abstract).

- [17] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1991. 1~662.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. Regional Geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 1~662 (in Chinese with English abstract).
- [18] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993. 1~707.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. Regional Geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 1~707 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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. 1~841.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 1~841 (in Chinese with English abstract).
- [20] 袁学诚. 中国地球物理图集[M]. 北京:地质出版社, 1996. 1~200.
Yuan Xuecheng (eds.). Geophysical Atlas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1~200 (in Chinese).
- [21] Zhao W J, Nelson K D, Project INDEPTH. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. Nature, 1993, 366: 557~559.
- [22] Le Fort P. Metamorphism and magmatism during the Himalayan collision [A]. In: Coward, M. P. & Ries, A. C. (eds). Collision Tectonics [C]. Geological Society Special Publication, 1986, 19, 159~172.
- [23] 崔军文. 喜马拉雅碰撞带的构造演化[J]. 地质学报, 1997, 71(2), 105~112.
Cui Junwen. Tectonic evolution of the Himalayan collision [J]. Acta Geological Sinica, 1997, 71(2): 105~112 (in Chinese with English abstract).
- [24] Jeffrey Lee, Bradley R, Hacker W S, et al. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints [J]. Tectonics, 2000, 19 (5): 872~895.
- [25] Turner S, Hawkesworth C J, Liu J, et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks [J]. Nature, 1993, 364: 50~53.
- [26] 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲, 等. 青藏高原北缘火山作用与构造演化 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996. 1~138.
Lai Shaocong, Deng Jinfu, Zhao Hailing, et al. Volcanism and Tectonic Evolution in the Northern Margin of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 1996. 1~138 (in Chinese).
- [27] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1~180.
Deng Wanming. Cenozoic Intraplate Volcanic Rocks in the Northern Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 1~180 (in Chinese with English abstract).
- [28] Cui Junwen, Tang Zheming, Deng Jinfu, et al. Early Paleozoic plate-tectonic in the Altun Mountains [A]. In: Proc. 30th Int'l Geol. Congr [C]. 1997, 7, 59~74.
- [29] 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系 [M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1~249.
Cui Junwen, Tang Zheming, Deng Jinfu, et al. Altun Fault System [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1~249 (in Chinese with English abstract).
- [30] 邓起东, 张培震, 冉勇康. 中国活动构造基本特征 [J]. 中国科学 (D), 2002, 32(12): 1020~1030.
Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, et al. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. Beijing: Science in China (Series D), 2003, 45(4): 355~372.
- [31] 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2), 442~450.
Zhang Peizhen, Wang Qi, Ma Zongjin. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet plateau [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 442~450 (in Chinese with English abstract).
- [32] Lombardo B, Rolfo F. Two contrasting eclogite types in the Himalayas: implications for the Himalayan orogeny [J]. Journal of Geodynamics, 2000, 30: 37~60.
- [33] Burbank D W, Beck R A, Mulder T. The Himalayan foreland basin [A]. In: Yin A, Harrison TM (ed.). The Tectonics of Asia [C]. New York: Cambridge University Press, 1996. 149~188.
- [34] Schlup M, Carter A, Steck A. Exhumation history revealed by fission track cooling ages the North Himalayan crystalline zone of eastern Ladakh, NW Himalaya [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2001, 19 (3A): 57~59.
- [35] Ratschbacher L, Frisch W, Liu G, et al. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India-Asia collision [J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 19817~19945.
- [36] Jiang M, Hirn A, Poupinet G. Tibetan plateau seismic experiment: design and preliminary results 1992~1993 [J]. Global Tectonic and Metallogeny, 1995, 4: 199~201.
- [37] 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等. 高原北部东昆仑-羌塘地区的岩石圈结构及岩石圈剪切断层 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31(增刊): 1~7.
Xu Zhiqin, Yang Jinsui, Jiang Mei, et al. Deep structure and lithospheric shear faults in the East Kunlun-Qiangtang region, northern Tibetan Plateau [J]. Science in China (Ser. D), 2001, 44(Supp.): 1~9.
- [38] 薛光琦, 姜枚, 宿和平, 等. 利用层析成像研究青藏高原叶城-狮泉河地区深部构造 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34: 329~334.
Xue Guangqi, Jiang Mei, Su Heping, et al. Tomographic study of the deep tectonics in the Yecheng-Shiquanhe area of the Tibetan Plateau [J]. Science in China (Ser. D), 2005, 48(4): 477~483.
- [39] 李才, 李永铁, 林源贤, 等. 西藏双湖地区蓝闪片岩原岩 Sm-Nd 同位素定年 [J]. 中国地质, 2002, 29(4): 355~359.
Li Cai, Li Yongtie, Lin Yuanxian, et al. Sm-Nd dating of the protolith of blueschist in the Shuanghu area, Tibet [J]. Geology in China, 2002, 29 (4): 355~359 (in Chinese with English abstract).
- [40] 姜枚, 许志琴, 薛光琦, 等. 青海茫崖-新疆若羌地震探测剖面及

- 其深部构造的研究[J].地质学报,1999,73(2):153~161.
- Jiang Mei, Xu Zhiqin, Xue Guangqi, et al. Seismic profiling between Mangnai, Qinghai and Ruqiang, Xinjiang and intrastucture study [J]. *Acta Geological Sinica*, 1999, 73 (2):153~161 (in Chinese with English abstract).
- [41] 丁道桂, 汤良杰. 塔里木盆地形成与演化[M].南京:河海大学出版社, 1996. 1~294.
- Ding Daogui, Tang Liangjie. Formation and Evolution of the Tarim basin[M]. Nanjing:Hehai University Press, 1996. 1~294 (in Chinese with English abstract).
- [42] 李秋生, 卢德源, 高锐, 等. 横断西昆仑-塔里木接触带的爆炸地震探测[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(增刊):16~21.
- Li Qiusheng, Gao Rui, Lu Deyuan, et al. An explosive seismic sounding profile across the transition zone between west Kunlun Mts. and Tarim Basin[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2001, 44(7): 666~672.
- [43] 许志琴, 曾令森, 杨经绥, 等. 走滑断裂、“挤压性盆-山构造”与油气资源关系的探讨[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2004, 29(6):631~643.
- XU Zhiqin, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, et al. Role of large-scale strike-slip faults in the formation of petroleum-bearing compressional basin-mountain range systems[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(6):631~643 (in Chinese with English abstract).
- [44] 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂[J]. 中国地质, 2002, 29(4):346~350.
- Ge Xiaohong, Liu Yongjiang, Ren Shoumai. Uplift dynamic of the Qinghai-Tibet Plateau and Altun fault[J]. *Geology in China*, 2002, 29(4):346~350 (in Chinese with English abstract).
- [45] Burtman V S, Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1993, 281:1~76.
- [46] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M].地质出版社, 1992. 1~190.
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, et al. *Orogenic Processes of the Songpan-Garzê Orogenic Belt of China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1~190 (in Chinese).
- [47] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2):101~117.
- Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Liguu, et al. Structural styles of the Longmenshan Thrust belt and evolution of the foreland basin in Western Sichuan Province, China[J]. *Acta Geological Sinica*, 1994, 7 (4):351~372 (in Chinese with English abstract).
- [48] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. 中国地质, 2002, 29(1):30~36.
- Li Yong, Hou Zhongjian, Si Guangying, et al. Cenozoic tectonic sequence and tectonic events at the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geology in China*, 2002, 29(1):30~36 (in Chinese with English abstract).
- [49] 滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力学过程与陆-陆碰撞新模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4):481~493.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Wang Guangjie, et al. The deep internal dynamical processes and new model of continental-continental collision in Himalayan collision orogenic zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(4):481~494 (in Chinese with English abstract).
- [50] 周华伟, Murphy M A, 林清良. 西藏及其周缘地区地壳、地幔地震层析成像——印度板块大规模俯冲于青藏高原之下的证据[J]. 地学前缘, 2002, 9(4):285~292.
- Zhou Huawei, Michael A M, Lin Qingliang. Tomographic imaging of the Tibet and surrounding region: evidence for Indian slab beneath the Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (4): 285~292 (in Chinese with English abstract).
- [51] Takada Y, Matsu'ura M. A unified interpretation of vertical movement in Himalaya and horizontal deformation in Tibet on the basis of elastic and viscoelastic dislocation theory [J]. *Tectonophysics*, 2004, 383:105~131.

Tectonic divisions of the Qinghai-Tibet Plateau and structural characteristics of deformation on their boundaries

CUI Jun-wen, ZHANG Xiao-wei, TANG Zhe-min

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China.)

Abstract: The determination of macroscopic structural characteristics has great significance for the study of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and its "dynamic model construction". The Qinghai-Tibet Plateau represents a gigantic "convergence-intracontinental subduction type" lithospheric block formed by amalgamation of six terranes of three plates (or old land), i.e. the North Kunlun-Altn Tagh-Qilian terrane of the Tarim-Sino-Korean plate, the South Kunlun terrane and Hoh Xil-Bayan Har terrane of the South China-Southeastern Asian plate and the Qiangtang terrane, Gangdise terrane and Himalayan terrane of Gondwanaland, through multiple breakups, convergences and intracontinental subductions. It is separated from the Indus lithospheric block, Tarim-Alxa-Ordos lithospheric block and Yangtze lithospheric block by the south Qinghai-Tibet Plateau marginal junction zone, north Qinghai-Tibet Plateau marginal junction zone and east Qinghai-Tibet Plateau marginal junction zone respectively. According to the present-day dynamic characteristics, this gigantic lithospheric block (first-order tectonic unit) may be subdivided into four second-order tectonic units, namely, the Himalayan block, northern Tibet block, southern Qinghai block and Kunlun-Altn Tagh-Qilian block, which are bounded by the Yarlung Zangbo junction zone, Xijir Ulan-Jinsha River junction zone and Central Kunlun junction zone successively. The four blocks may be further divided into several fault-bounded third-order tectonic units (terrane).

The various tectonic units making up the gigantic Qinghai-Tibet lithospheric block are situated in a unifying geodynamic system. This geodynamic system is generally manifested as follows: the Himalayan block and Kunlun-Altn Tagh-Qilian block on the southern and northern sides of the Qinghai-Tibet lithospheric block are asymmetrically thrust toward and stacked on the cold and rigid Indus lithospheric block and Tarim-Alxa-Ordos lithospheric block respectively in the tectonic setting that the Indian plate is continuously and strongly subducted beneath the Eurasian plate and the hot Qinghai-Tibet lithospheric block with ductile rheological properties moves en bloc in a NNE direction. Beneath the northern Tibet block and southern Qinghai block in the interior of the Qinghai-Tibet Plateau, large numbers of low-velocity bodies at depth upwell and propagate horizontally from west to east. In this tectonic setting, the former is superimposed by nearly N-S compression, forming a tectonic framework marked mainly by N-S-trending downfaulted zones and NW- and NE-trending conjugate strike-slip motions; whereas for the latter, except for the Songpan-Garzê terrane that shows south-vergent thrust stacking, the Hoh Xil-Bayan Har terrane is mainly manifested by sinistral strike-slip motion leading to successive eastward extrusion, so that the whole southern Qinghai block experiences thrust propagation toward the Yangtze block and spreading toward the Sanjiang tectonic zone. Therefore, with increasing rate of uplift with time, the plateau also propagates gradually toward the rigid blocks at its peripheries, i.e. the area of the plateau expands progressively. So the plateau boundaries have the nature of propagation. On the basis of the propagation mechanism, two types of dynamic boundary may be distinguished: strike-slip type propagation boundary and thrust type propagation boundary. The typical propagation boundary is located in the Altn Tagh Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and the Sanjiang area on the eastern margin of the plateau. The dynamic boundary on the southern margin of the plateau belongs to the typical thrust type propagation boundary, while the dynamic boundary in the Qilian and Longmen mountains has both the nature of thrust propagation and the nature of strike-slip propagation.

Key words: Qinghai-Tibet lithospheric block; terrane; subduction; horizontal propagation; geodynamic system

About the first author: CUI Jun-wen, male, born in 1938, senior researcher, engages in structural geology and tectonics; E-mail: cuijunwen@ccsd.org.cn.