

青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力

许志琴 杨经绥 李海兵 张建新 曾令森 姜 枚

(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)

提要:运用地体和地体活动论观点,提出青藏高原结构划分的新方案;强调青藏高原的形成经历了新元古代以来长期活动的过程,青藏高原是一个“非原地”诸多地体会聚、拼合以及经历复合碰撞造山的“造山的高原”;大型走滑断裂在青藏高原形成中起着地体相对位移、侧向挤出、移置及使高原几何形态扭曲的作用。提出青藏高原隆升的“南缘超深俯冲(>600km)、北缘陆内俯冲、腹地深部热结构及岩石圈范围内的向 NE 右旋隆升”的多元驱动力机制。

关键词:青藏高原;非原地地体拼合;复合碰撞造山;走滑构造;多元驱动力

中图分类号:P541 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)02-0221-18

青藏高原是具有特殊几何形态和地貌景观的、正在快速隆起的大陆地块,高原内部是广阔又平坦的地域,其周缘为高峻陡峭、剧烈起伏的山链,构成了一堵与外界隔绝的屏障。

青藏高原是世界上最高、最厚、最新和体积最大的高原,具有十分复杂地质结构、物质组成、流变学特征和独特的深部物理状态。青藏高原隆升是地球上新生代最壮观的事件,它影响了资源的再分配及生存环境的变化,并在其内部及边缘诱发了至今异常活跃的地震灾害;青藏高原又是亚洲大陆的最后拼合体,它所显示出的地壳破损镶嵌结构,示踪了地质历史上诸地体多次离散、聚敛和碰撞造山动力学过程的证据,直至 60~50 Ma 印度/亚洲的最终碰撞。印度/亚洲的重大碰撞事件形成了广泛的大陆变形域,作为世界地学瑰宝之一的青藏高原已成为公认的大陆动力学研究的最佳实验室和窗口。

1 青藏高原研究聚焦与大陆动力学

大陆岩石圈是一个不均一、不连续、具多层结构和复杂流变学特征的综合体。大陆地壳没有共同的成因和起源,它是由不同块体的不同物质组成的集合体,具有大范围变化的构造和热历史,流体和熔融体的相互作用又改变了流变学的结构。因此,比大洋岩石圈老得多、厚得多和具有复杂流变学结构和演化过程的大陆岩石圈使板块“登陆”受到很大阻力,

大陆岩石圈并非刚性块体,变形作用也绝非只发生在板块边界的狭窄地带。人们愈来愈发现运用经典的板块理论很难解释大陆地质,譬如:长期活动的造山带的形成、大陆碰撞造山热的成因、印度/亚洲碰撞造成的巨大陆内变形域、青藏高原的隆升、大陆深俯冲和超高压变质作用以及超高温变质作用等难题。一个以解决大陆结构、行为、动态演化和驱动力,以及发展板块构造理论为目的的大陆动力学研究计划在 20 世纪 90 年代已经开始,在世界上大多数地学家中产生强烈反响。大陆动力学理论的完善是一场新的地学变革,是继“板块构造”之后固体地球科学发展的新的里程碑。

自 19 世纪末 20 世纪初开始^[1-10],青藏高原研究已 100 多年,众多的中国和外国地学家前赴后继的研究和合作以及广泛的区域地质和地球物理调查,不仅揭示了青藏高原所显示的复杂镶嵌结构,示踪了地质历史上诸地体多次离散、聚敛、碰撞、移置、增生及联合^[11-18],揭示了 65~45 Ma 以来印度板块与欧亚大陆南部碰撞^[19-20]及其产生的巨大效应^[29-30];还初步揭示了青藏高原地壳、岩石圈及深地幔结构的基本构架^[31-38]。

青藏高原具有“多陆块、多岛弧”组成的基本格架及显示“多洋(海)盆、多俯冲、多碰撞和多造山”的动力学作用过程。在不同历史阶段的洋盆开启和闭合致使块体汇聚和碰

收稿日期:2006-03-14;改回日期:2006-03-20

基金项目:本研究先后得到原地矿部中法“松潘-甘孜造山带造山过程”项目、中法“东昆仑及邻区岩石圈缩短机制研究”项目、国土资源部“祁连山-阿尔金山地质演化及岩石圈剪切作用”、国家自然科学基金重点项目“祁连造山带的组成及造山过程”及国土资源部科技专项“青藏高原的碰撞造山及其效应”课题“青藏高原地体边界及岩石圈剪切断裂”的资助。

作者简介:许志琴,女,1941年生,留法博士,中国科学院院士,从事大地构造学及构造地质学研究;E-mail: xzq@ccsd.org.cn。

撞,多块体拼贴构筑成复合陆体;块体的碰撞产生碰撞造山带,碰撞造山带的拼贴及叠置又形成复合碰撞造山拼贴体。由复合地体和复合造山拼贴体组成的青藏高原是在新元古代以来长期活动、多期造山及新生代最后隆升的基础上形成的高原,又称为“造山的高原”(Orogenic Plateaux)^[39]。

研究表明,组成青藏高原的诸多陆块和复合陆块并非原位,它们均来自靠近冈瓦纳大陆的一侧。陆块之间的会聚及俯冲使陆块消减,在地体碰撞过程中形成的大型剪切带及大型断裂的作用使陆块或复合陆块叠覆、错位、挤出和远离原地,后期大型盆地的形成又使块体和复合块体的原型遭到覆盖。因此,青藏高原的重大关键问题已不仅是65~45 Ma以来印度和亚洲碰撞形成高原以及引起大陆岩石圈数千千米变形,再造巨大的地体拼合体和碰撞造山拼贴体相互作用及大陆增生的地质历史过程,成为青藏高原研究的重要内容。其包括了组成各陆块单元的古地理位置、原型、归属和特征,古洋盆的开启及消减,陆块之间相互运动的轨迹、拼合与叠置的方式,碰撞造山类型、造山过程、造山叠置以及造山机制,大型走滑构造的形成和对青藏高原结构的改造,以及深部结构、壳幔相互作用和驱动力等。青藏高原所具有的十分复杂的地壳-岩石圈流变学特征给青藏高原形成历史及动力学机制研究带来了很大困难。

因此,从大陆动力学和活动论的角度出发,结构、块体边界以及块体运动学是青藏高原大陆动力学研究的根本;印度/亚洲碰撞前和后的块体拼合及碰撞动力学的历史重塑为青藏高原大陆动力学研究的焦点,深部地壳、地幔结构的揭示和驱动力的探究是青藏高原大陆动力学研究的关键。

结合大陆动力学的研究,青藏高原的固体地球科学研究聚焦可以归结为如下关键问题:

(1)青藏高原的诸块体在地质历史中古地理位置、性质和归属。显生宙以来特提斯洋盆的开启、扩张、消减、转换和最终闭合的过程,以及如何促使诸块体的不断会聚、俯冲、增生和拼合,形成巨型块体拼合体及“多洋(海)盆、多陆块、多岛弧、多俯冲、多碰撞”动力学过程?如何科学重建和确定青藏高原中诸块体会聚的前锋、会聚轨迹和洋壳/陆壳俯冲极性?

(2)显生宙以来青藏高原的诸块体会聚和碰撞的主要时期。是否存在晚古生代(华力西期)的碰撞造山?在块体会聚和碰撞过程中如何形成不同类型的俯冲-碰撞山链和叠置山链?山链及叠置山链的不同构造样式、造山极性及其碰撞动力学?碰撞山链又如何不断生根、消融以及拆沉?大陆岩石圈如何在块体拼合中不断增生、保存和去除?俯冲-碰撞山链如何聚成长期活动的巨大碰撞造山拼贴体?造山热(花岗岩浆、高温变质作用及韧性变形)的产生主要与前造山的构造热背景还是与造山过程有关^[40]?

(3)大印度板块变成小印度板块过程中,亚洲大陆一侧近2000 km的南北向缩短量是以什么方式被吸收的^[39,41]?印

度/亚洲碰撞如何造成2500 km宽的大陆变形域^[29,30]?为什么新生代变形主要集中在高原的周缘及内部的地体边界或古构造带上,而广大地区为弥散变形?在挤压的大背景下,构造应力如何分解为缩短、伸展与走滑分量?目前一个重要的争论问题是:青藏高原的新生代变形是以连续均匀方式为主,还是以岩石圈刚性块体之间的变形(即不连续均匀变形)为主^[30]?如果前者,则断裂作用对大陆生长过程不起重要作用,如果后者则相反。

(4)青藏高原的北缘(祁连山、阿尔金山)发现早古生代超高压变质带,揭示了洋壳/陆壳深俯冲的重大事件,洋壳/陆壳深俯冲的背景及其转换机制产生的条件?南缘(喜马拉雅山)保存了新生代超高压变质带,反映了印度陆壳的深俯冲作用,具浮力、较轻和低密度的陆壳如何俯冲至地幔深度形成含柯石英榴辉岩,然后又折返上来使超高压变质岩石出露在西北喜马拉雅的构造结部位^[42,43]?

(5)印度/亚洲碰撞导致青藏高原内部高原地貌的形成和周缘造山带崛起。青藏高原内部高原地貌形成的表生地质过程与深部地质过程?青藏高原内部古高程的确定及对青藏高原隆起的制约?周缘造山带崛起受两种挤出机制的影响:一种是青藏高原南、北缘(喜马拉雅山和祁连山)高挤压速率(分别为18 mm/a年和16 mm/a)下的物质垂(斜)向挤出;另一种是青藏高原物质的向东及南东方向的侧向挤出(逃逸),使高原的东南缘几何形貌发生严重扭曲。在研究垂向和侧向两种“挤出”机制及其在青藏高原隆升中究竟起着何种作用时,应考虑如下问题:(1)周缘克拉通的制约?(2)下地壳熔体对下地壳流变学性质的影响及对物质挤出样式、方式的驱动?(3)大型走滑断裂及块体旋转对侧向挤出的规模、层次、运移方式、速率和时限的影响?(4)青藏高原复杂岩石圈流变学结构如何导致非板块行为?(5)周缘造山带、内部高原地貌及外侧盆地的三者互馈关系?

(6)青藏高原岩石圈/地幔结构的研究是揭开青藏高原隆升的深部驱动力内幕的关键,主要的问题是:青藏高原地壳/岩石圈流变学结构剖面和地幔各向异性的揭示和解释?碰撞造山及花岗岩浆作用的叠置性、长期性及多期性,以及它们与地壳的流变学特征、热结构与热历史以及壳幔相互作用的关系?地体边界上是否保留古岩石圈俯冲的“化石”残片和拆沉记录?大型走滑构造往下延伸深度?青藏腹地出现的大面积新生代碱性火山喷发与深地幔的低速异常结构的关系?印度岩石圈板块的俯冲几何学、运动学、俯冲深度、速率、时限及俯冲的最远距离?是否存在除南部印度板块向北俯冲以外的其他陆内俯冲的驱动力?

从上面思考和研究的问题来看,青藏高原固体地球科学的研究已经步入以大陆结构、行为和驱动力为主导的大陆动力学的研究轨道,远远超出青藏高原传统大地构造研究范畴。青藏高原大陆动力学研究已经向地体拼合、碰撞动力学及高原隆升的深部驱动力研究方面聚焦,这是一个长期的任务。

2 青藏高原巨型地体拼合体的结构单元及活动体系

前人对青藏高原的基本构造单元的划分曾采用不同的名称:“板块”、“块体”、“陆块”和“地体”等。最近潘桂堂等^[14]推出大地构造单元划分的“构造区”新版本:以青藏高原中多岛弧盆系的形成及洋/陆岩石圈体制转换为出发点,将碰撞结合带、夹持陆块与岩浆弧作为单元划分的基础,将青藏高原大地构造单元划分为“泛华夏大陆早古生代秦祁昆构造区”、“泛华夏大陆晚古生代羌塘—三江构造区”和“冈瓦纳北缘晚古生代—中生代冈底斯—喜马拉雅构造区”。该版本有许多新的思路,给笔者诸多启示。

2.1 地体单元

笔者主张以“地体”作为青藏高原结构划分的基本单元,其主要原因是:地体构造理论是板块构造理论的发展,地体概念最早由 Monger (1975,1977) 提出,David G. Howell 等^[45]予以完善。地体实际上指的是“构造地层地体”或“变质地体”。是以断裂(或缝合带,或结合带)为边界的具有区域性延伸的地质实体,每个地体内的沉积、构造、火成作用和变质作用是统一连贯的,每个地体均有与相邻地体不同的地质历史。按地体运动学的观念,又分为“增生地体”及“移置地体”或“外来地体”。“增生地体”是指地体拼合到大陆前缘,成为大陆地壳的增生体(或增生楔),使大陆地壳在空间上扩大化,在性质上复杂化^[46]。笔者认为运用地体和地体活动论的观点划分青藏高原基本构造单元有利于恢复和再造陆块的原型,有利于用运动学的眼光审视地体的增生、移置和挤出,有利于认识复杂化的生长的大陆地壳。

2.2 地体边界

地体边界的确定是准确划分地体单元的首要条件。地体边界记录了洋(海)盆开启、俯冲、会聚、闭合、碰撞造山及陆内俯冲的全过程,也包含了地体之间正向和斜向运动形成的各类大型断裂对地体制约的信息,因此地体边界对于大陆动力学的研究极其重要。印度/亚洲碰撞前的历史是诸多地体拼合和碰撞的过程,拼合和碰撞的动力学过程主要在地体的边界进行,并形成俯冲—碰撞的板块动力学体制和造山域。研究表明,俯冲—碰撞体制并不是一条狭窄的缝合带,而是一条宽数千米至数十千米的构造带。其组成包括两部分:

(1) 俯冲杂岩带(Subduction Complex, SC)。由蛇绿岩、蛇绿混杂岩、弧前增生楔、俯冲剥蚀带及高压—超高压变质带组成。

① 蛇绿岩:分为洋脊型蛇绿岩(MORB)和洋壳俯冲上盘蛇绿岩(Super Subduction Zone, SSZ)两类,分别代表了洋盆打开和洋盆俯冲的背景和时代。蛇绿混杂岩代表了俯冲阶段洋壳物质与蛇绿岩、沉积岩块体的混杂体,在折返中和蛇绿岩残片伴生,就位于缝合带,或呈推覆体叠置在被动陆缘之上,如雅鲁藏布缝合带南部特提斯—喜马拉雅带上的蛇

绿岩和蛇绿混杂岩的推覆体。

② 弧前增生楔与俯冲剥蚀带:大洋岩石圈俯冲时形成两类活动陆缘:加积板块边缘(accretionary plate margins),即弧前加积楔,在洋壳俯冲上盘形成;剥蚀板块边缘(erosive plate margins),即大洋岩石圈板片俯冲作用将上部板片中大量陆壳物质拖拽下去,在海沟地带形成板块边缘的剥蚀楔。已经证明在全球具有板块剥蚀边缘特征的地带有太平洋东岸中南段的墨西哥—北智利、太平洋西岸的日本岛弧东侧的 Kurile—IsuMariana 及澳大利亚东岸的 Tonga—Kermadec,弧前增生楔经常变成剥蚀板块边缘的组分。

③ 高压—超高压变质带:高压—超高压变质带(HP—UHP)的发现揭开了洋壳和大陆壳物质可以俯冲、深俯冲(100 km)乃至超深俯冲(>200~300 km)深度的重大事件中^[47]。在青藏北部发育北祁连高压变质带是 480~460 Ma 洋(海)盆俯冲的结果,由于都兰石榴石白云母片麻岩中柯石英的发现而确定的柴北缘超高压变质带^[48]是 495~440 Ma 的洋(海)盆深俯冲到陆壳深俯冲的复合产物^[48~55]。在青藏南缘的喜马拉雅西构造结的南迦帕尔巴特地区先后找到榴辉岩^[42~43],并发现柯石英包裹体,超高压变质峰期的温压条件为 650 °C 和 2.6 GPa,推测西构造结地区经历了大约 49 Ma 印度陆壳的深俯冲作用。

(2) 活动陆缘增生带。活动陆缘增生带(Active continental margin accretional zone, ACC)由火山岛弧岩浆带及弧后盆地组成。活动陆缘增生带是火山岩岛弧带在俯冲上盘活动陆缘一侧形成的增生体。洋壳俯冲形成的岛弧火山岩经常与“I”型花岗岩伴生,弧后盆地是洋壳俯冲在活动陆缘弧后拉伸的产物。

这里需要指出的是洋盆岩石圈俯冲的物质有时没有被折返上来,因此在地体边界往往不保存俯冲杂岩带,如金沙江缝合带玉树及以西地带就没有发现古特提斯蛇绿岩;经历长期剥蚀的火山岩岛弧带还可能只剩下根部的岛弧花岗岩,如东昆仑北部布尔汗布达山的大片三叠纪岛弧花岗岩为活动陆缘根部的产物。洋盆岩石圈的深俯冲模拟实验^[56]表明火山岛弧岩石还可以被拽到海沟中而消失。在上述情况下,会聚边界活动陆缘的前锋的确定是认识俯冲极性的重要标志,因此边界的研究需要综合的分析才能得出科学的结论。

2.3 青藏高原的地体单元和地体边界的划分及活动体系

组成青藏高原是诸多地体(或小陆块)在青藏高原形成的地质历史中,都曾身处异地,地体拼合的过程也是“非原地”的地体移置、拼贴和增生的过程,地球上最壮观的事件:60~50 Ma 印度陆块与亚洲大陆的碰撞完成了最后的拼合及增生,使印度板块成为亚洲大陆最后的成员。

印度/亚洲前碰撞历史是从新元古代开始的长期活动历史,经历了早古生代、晚古生代—三叠纪和晚中生代的地体会聚—碰撞三个阶段,以及泥盆纪、三叠纪和晚侏罗—早白垩世的多期碰撞造山事件。由于印度/亚洲前碰撞历史是以诸

多地体的会聚为特征,因此可以通过地体结构及地体边界的研究以及各时期地体边界两侧陆壳的变形特征和动力学过程的揭示,来探究青藏高原形成前诸地体与亚洲北部逐渐拼合和大陆增生的过程。60~50 Ma 印度/亚洲的最后碰撞,不仅使亚洲大陆增生了喜马拉雅地体,而且使亚洲大陆发生向东与南东的挤出,同时形成内部高原地貌和周缘新生代造山带的两个新的大地构造单元。

笔者提出“以地体的性质及地体边界作为地体划分依据,以显生宙以来地体拼合与碰撞的主要时期——早古生代、三叠纪、晚中生代以及新生代碰撞事件形成的复合地体、增生复合地体和增生、挤出及移置地体作为基本构造单元”,形成青藏高原基本单元新的划分方案。基于地体的裂解、运动、会聚、就位及改造是不停顿运动的结果,该方案以活动论为指导思路。

青藏高原大地构造单元组成可分为两大部分:

(1) 60~50 Ma 印度/亚洲碰撞前形成的两个复合(增生)地体:

①“阿尔金—祁连—昆仑”早古生代复合地体。由祁连地体、柴达木地体、东昆北地体、东昆南地体、阿尔金地体、西昆北地体和西昆南地体等组成青藏高原北部的地体拼合体,地体之间的边界有早古生代形成的北祁连俯冲杂岩带和活动陆缘增生带,柴北缘俯冲杂岩带和活动陆缘增生带,祁漫塔格俯冲杂岩带和活动陆缘增生带,昆中俯冲杂岩带和活动陆缘增生带,北阿尔金俯冲杂岩带和活动陆缘增生带,南阿尔金俯冲杂岩带和活动陆缘增生带以及库地俯冲杂岩带和活

动陆缘增生带等。该复合地体向东与北秦岭早古生代地体及丹凤俯冲杂岩带和陆缘活动增生带相连。通过对阿尔金断裂两侧地体(祁连和阿尔金地体)和地体边界(北祁连和北阿尔金早古生代俯冲杂岩带,柴北缘南阿尔金早古生代俯冲杂岩带)的对比,确定了阿尔金山是祁连山的西延。

②“松潘甘孜—羌塘—拉萨”三叠纪—早白垩世复合地体。松潘—甘孜地体、羌塘地体和拉萨地体拼合组成青藏高原中部的地体拼合体。地体之间的边界为昆南—阿尼玛卿俯冲杂岩带和活动陆缘增生带、金沙江俯冲杂岩带和活动陆缘增生带、班公湖—怒江俯冲杂岩带和活动陆缘增生带,以及由于新特提斯洋盆俯冲在拉萨地体南缘形成的雅鲁藏布江俯冲杂岩带及冈底斯活动陆缘增生带。

最新研究表明,在羌塘地体内部存在一条分割南、北羌塘的由二叠纪蛇绿岩和三叠纪高压变质带组成的双湖—龙木错俯冲杂岩带^[7],使“松潘—羌塘—拉萨”复合地体的结构更复杂化。

(2) 60~50 Ma 印度/亚洲碰撞形成的增生—挤出—移置地体:印度/亚洲碰撞形成长 2 500 km、宽 300~500 km、向南突出的 EW 向弧形“喜马拉雅”增生地体。在此过程中,印度/亚洲碰撞造成物质向东和南东运动,在走滑断裂——鲜水河左行走滑断裂、金沙江左行走滑断裂、嘉里—红河右行走滑断裂和三盖—民垠右行走滑断裂的制约下,使“松潘—羌塘—拉萨”复合地体向南东挤出,形成云南挤出地体和缅甸挤出地体,导致青藏高原几何形态的扭曲。

青藏高原北缘阿尔金主断裂和北阿尔金断裂的左行走

表 1 青藏高原地体结构与地体边界

Table 1 Terrane structure and boundaries of the Qinghai-Tibet Plateau

编号	单元名称	地体组成	地体边界 俯冲杂岩带(SC) 活动陆缘增生带(ACA)
I	阿尔金—祁连—昆仑(ALT-QL-KL) 早古生代复合地体	祁连(QL)地体	北祁连逆冲断裂(NQLT)
		柴达木(QDM)地体	北祁连SC+ACA
		东昆仑北(N.EKL)地体	柴北缘SC+ACA
		东昆仑南(S.EKL)地体	祁漫塔格SC+ACA
		阿尔金(ALT)地体	昆中SC+ACA
		西昆仑北(N.WKL)地体	南阿尔金SC+ACA
		西昆仑南(S.WKL)地体	库地SC+ACA 康西瓦 SC+ACA
II	松潘—羌塘—拉萨增生地体 (SG-QT-LS)	松潘—甘孜(SP-GZ)地体 羌塘(QT)地体	昆南—阿尼玛卿SC+ACA 金沙江SC+ACA
	晚侏罗—早白垩世增生地体	拉萨(LS)地体	
III	喜马拉雅(HM) 新生代增生地体	特提斯—喜马拉雅(THM)亚地体	雅鲁藏布江SC+ACA
		高喜马拉雅(GHM)亚地体	
		低喜马拉雅(LHM)亚地体	
		次喜马拉雅(SHM)亚地体	
IV	侧向挤出—移置地体(新生代)	云南(YN)挤出地体	鲜水河韧性左行走滑剪切带 (XSHF)
		三盖(SG)挤出地体	班公湖—红河韧性走滑剪切带 (BG-RRF)
		阿尔金—西昆仑(ALT-WKL)移置地体	雅鲁藏布江右行走滑断裂 (YLZBF)
			阿尔金断裂系(ALTf)

滑作用,使其西侧的阿尔金地体和西昆仑地体向 SWW 方向移动,形成阿尔金移置地体和西昆仑移置地体。

此外,按现代的地貌-构造特征又可将青藏高原分为中

央高原和周缘造山带(南缘喜马拉雅造山带、北缘西昆仑—阿尔金—祁连造山带及东缘龙门—锦屏造山带)两大基本单元(图 1,表 1)。

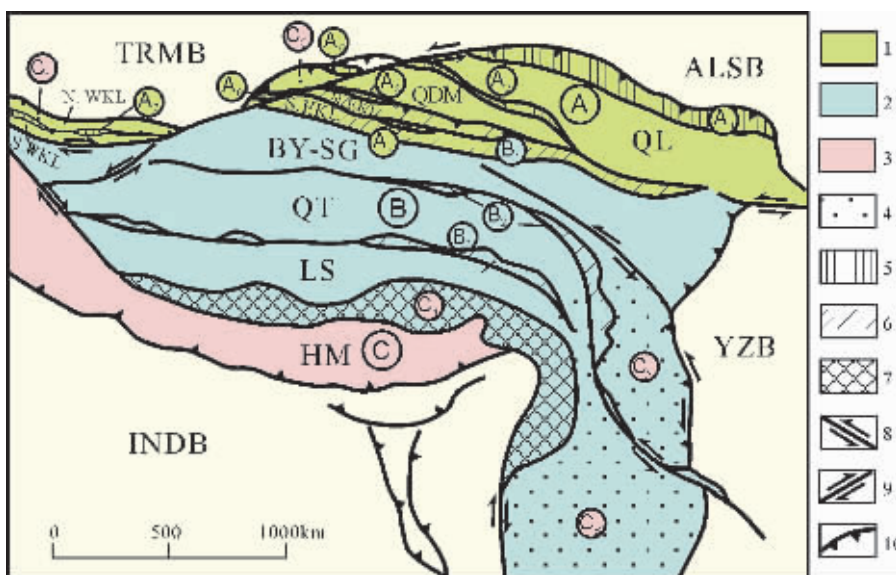


图 1 青藏高原结构图

- 1—早古生代复合地体;2—中生代增生复合地体;3—新生代增生地体;4—挤出—移置地体;5—早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;
 - 6—早中生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;7—晚中生代—早新近纪俯冲杂岩带和活动陆缘带;8—左行走滑断裂;9—右行走滑断裂;10—逆冲断裂
 - A—阿尔金—祁连—昆仑早古生代复合地体;QL—祁连亚地体;QDM—柴达木亚地体;N.EKL—东昆仑北亚地体;
 - S.EKL—东昆仑南亚地体;ALT—阿尔金亚地体;N.WKL—西昆仑北地体;S.WKL—西昆仑南地体;
 - B—松潘甘孜—羌塘—拉萨增生复合地体;BY—SG—巴颜喀拉—松潘甘孜亚地体,QT—羌塘亚地体,LS—拉萨亚地体;
 - C—青藏高原周缘增生、挤出、移置地体;C_A—喜马拉雅增生地体;C_B—云南挤出地体;C_C—掸邦挤出地体
- 地体边界:A₁—北祁连早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;A₂—柴达木北缘早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;A₃—祁曼塔克早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;A₄—昆中早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;A₅—北阿尔金早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;A₆—南阿尔金早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;A₇—库地早古生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;B₁—东昆仑—阿尼玛卿三叠纪俯冲杂岩带和活动陆缘带;B₂—金沙江三叠纪俯冲杂岩带和活动陆缘带;B₃—班公湖—怒江中生代俯冲杂岩带和活动陆缘带;C₁—雅鲁藏布江俯冲杂岩带和冈底斯活动陆缘带;
- INDB—印度陆块;YZB—扬子陆块;ALSB—阿拉善陆块;TRMB—塔里木陆块

Fig.1 Map showing the structural architecture of the Qinghai-Tibet Plateau

- 1—Early Paleozoic composite terrane;2—Mesozoic accretionary composite terrane;3—Cenozoic accretionary terrane;4—Extruded-displaced terrane;
- 5—Early Paleozoic subduction complex zone and active continental-margin zone;6—Early Mesozoic subduction complex zone and active continental-margin zone;
- 7—Late Mesozoic-early Neogene subduction complex zone and active continental-margin zone;
- 8—Sinistral strike-slip fault;9—Dextral strike-slip fault;10—Thrust fault

Organization of terranes:A—Early Paleozoic Altyn Tagh-Qilian-Kunlun composite terrane;QL—Qilian subterrane;QDM—Qaidam subterrane;N.EKL—East Kunlun-Northern Asia subterrane;S.EKL—East Kunlun-Southern Asia subterrane;ALT—Altyn Tagh terrane;N-WKL—Northern West Kunlun terrane;S-WKL—Southern West Kunlun terrane;B—Songpan-Garzê-Qiangtang-Lhasa accretionary composite terrane;BY-SG—Bayan Har-Songpan-Garzê subterrane;QT—Qiangtang subterrane;LS—Lhasa subterrane;C—Accretionary;extruded and displaced terranes at peripheries of the Qinghai-Tibet Plateau;C_A—Himalaya accretionary terrane;C_B—Yunnan extruded terrane;C_C—Shan extruded terrane

Terrane boundaries:A₁—Early Paleozoic North Qilian subduction complex and active continental-margin zone;A₂—Early Paleozoic Northern Qaidam marginal subduction complex and active continental-margin zone;A₃—Early Paleozoic Qimantag subduction complex and active continental-margin zone;A₄—Early Paleozoic Central Kunlun subduction complex and active continental-margin zone;A₅—Early Paleozoic North Altyn Tagh subduction complex and active continental-margin zone;A₆—Early Paleozoic South Altyn Tagh subduction complex and active continental-margin zone;A₇—Early Paleozoic Küda subduction complex and active continental-margin zone;B₁—Triassic East Kunlun-A'nyemaqên subduction complex and active continental-margin zone;B₂—Triassic Jinsha River subduction complex and active continental-margin zone;B₃—Mesozoic Bangong Co-Nujujiang subduction complex and active continental-margin zone;C₁—Yarlung Zangbo subduction complex and Gangdise active continental-margin zone

INDB—Indian block;YZB—Yangtze block;ALSB—Alxa block;TRMB—Tarim block

3 青藏高原地体拼合及“多(海)盆、多陆块、多岛弧、多俯冲、多碰撞”动力学过程

最新的古地磁研究进一步表明^[58],组成青藏高原的诸地体的古地理位置、性质和归属,以及在各个重大历史阶段中的拼合和增生是与特提斯洋盆包括始特提斯洋(新元古代—早—中泥盆世)、古特提斯洋(中石炭世—早三叠世)和新特提斯洋(晚三叠世—晚白垩世)的不断开启与闭合以及印度洋的最后打开(早中新世—现在)有着密切的关系。

3.1 始特提斯洋盆与“多洋(海)盆/多地体/多岛弧”体系

初步研究表明,青藏高原北部带的“阿尔金—祁连—昆仑”早古生代造山带是由诸多的地体/岛弧组成,根据北祁连—北阿尔金带中代表初始洋壳的蛇绿岩年龄早于 550 Ma^[59-61],柴北缘和库地蛇绿岩年龄早于 510 Ma^[62-63],表明地体边界蛇绿岩中保留始特提斯洋盆(新元古代—早古生代)的记录。青藏高原北部早古生代板块体制重塑的研究表明,位于青藏北部的阿尔金—祁连地体、柴达木地体、东昆仑地体、阿尔金地体和西昆仑地体以及北秦岭地体中发育诸多早古生代火山岛弧——北祁连—北阿尔金火山岛弧、柴北缘—南阿尔金火山岛弧、祁曼塔格火山岛弧、中昆仑火山岛弧、库地火山岛弧及北秦岭二郎坪火山岛弧等,说明青藏高原北缘在早古生代曾处在始特提斯洋一侧的多地体/多岛弧环境。古地磁和全球大陆复原资料表明^[58],在 550 Ma 前冈瓦纳大陆与西伯利亚陆块、北美陆块和波罗的陆块之间存在始特提斯洋,北中国陆块和其他一系列小陆块一起,构成位于冈瓦纳大陆澳大利亚的西缘、始特提斯洋东侧的多陆块群(图 2)。推测它们之间分布的蛇绿岩和俯冲杂岩带代表具有扩张性质的边缘海盆的洋壳组分,而这些边缘海盆与外侧的始特提斯洋盆有密切的成因联系。因此尽管青藏高原北部陆块/岛弧群的确切位置尚未锁定,但是可以推测现地体/岛弧群曾经位于始特提斯洋盆和冈瓦纳大陆之间,是环始特提斯洋地体/岛弧群(活动带)的成员^[54]。

3.2 始特提斯洋盆俯冲及活动陆缘带形成时限

代表洋(海)盆俯冲的北祁连高级蓝片岩形成的时代为 480~460 Ma^[64],与蓝片岩伴随的高压榴辉岩的锆石 SHRIMP U—Pb 定年的(463±6)Ma 和(468±13)Ma,代表了大洋板块俯冲至上地幔深度形成榴辉岩相的时限。北祁连火山岛弧时代 486~438 Ma^[64]、柴北缘火山岛弧时代 U—Pb 年龄是 514~486 Ma^[60,62,66]及中昆仑火山岛弧时代(530~518 Ma)^[54],表明冈瓦纳大陆澳大利亚西侧边缘海盆俯冲(即火山岛弧带形成的时代)自外向里有渐新的趋势,这是早古生代多地体/岛弧的加积作用的反映。

上述表明,组成现在青藏高原北部的诸地体在 510~460 Ma 期间曾位于靠近冈瓦纳大陆的一侧,由于始特提斯洋盆的俯冲作用,成为“始特提斯洋南缘地体/火山岛弧群”的一部分。在 420~390 Ma 期间这些地体又通过“弧—陆”和

“陆—陆”先后拼合及碰撞造山^[55],并与中朝、塔里木陆块(克拉通)等一起组成位于冈瓦纳西缘的“始北中国早古生代复合地体”。

必须提及的问题是在“始北中国早古生代复合地体”中发现了重要的早古生代柴北缘—南阿尔金超高压变质带和北祁连—北阿尔金变质带^[67],它们的形成可能与早古生代始特提斯洋盆有关的边缘海盆的深俯冲及继后的陆壳深俯冲有关^[55]。

3.3 特提斯洋盆演化与俯冲极性

古地磁和全球大陆复原资料还表明^[58],继始特提斯洋盆闭合及地体拼合(D₃)之后,中石炭世开始西伯利亚陆块、北美陆块、波罗的陆块和冈瓦纳大陆开始汇聚,在中二叠世拼合成“联合大陆”(Pangaea)。同时特提斯洋盆产生,并经历了古特提斯(C₂—T₁₋₂)和新特提斯(T₃—E₁)洋盆发育的两个阶段。

3.3.1 古特提斯(C₂—T₁₋₂)洋盆演化及俯冲极性

中石炭世开始,古特提斯洋盆的打开和不断扩张使“始北中国早古生代复合地体”、“始华南早古生代复合地体”、“Siam 地体”和基墨里(羌塘)地体^[68-69]等先后朝北运移,并接受了海相沉积。

根据古特提斯洋盆的蛇绿岩残片研究,已确定昆南—阿尼玛卿蛇绿岩带形成于 C—P^[70-72]和早三叠世向北俯冲形成东昆仑活动陆缘带;金沙江—理塘蛇绿岩带形成于 C—P,早三叠世向南和南西俯冲于羌塘(昌都)地体之下,形成包括义敦—玉树火山岛弧带和理塘弧后盆地(具洋壳性质)在内的羌塘—昌都活动陆缘带^[73]。上述两条蛇绿岩带代表的古特提斯洋盆可分别称之为古特提斯北大洋和古特提斯南大洋。洋盆的消减是通过反向俯冲(北大洋向北和南大洋向南的俯冲极性)实现的。

洋盆的闭合使 3 个地体会聚及碰撞。由于包含中朝陆块、阿拉善陆块和塔里木陆块的“北中国板块”北面联合大陆中的西伯利亚陆块已经连接。南面与“扬子地体”首先在东端(大别—苏鲁)碰撞,并在 240~220 Ma 产生陆壳的深俯冲^[74]。与此同时,基墨里—羌塘地体与“扬子地体”的 SW 部分(保山—中甸)拼合、碰撞。由于古特提斯洋盆“反向俯冲”的运动学极性,致使在“北中国板块”、“扬子地体”和基墨里—羌塘地体之间形成宽阔的倒三角形的松潘甘孜被动陆缘海盆,堆积了巨厚复理石建造。三叠纪末的 3 个地体在西部的碰撞实现了南北块体之间的完全碰撞,形成“松潘—羌塘三叠纪复合增生地体”,并形成由早古生代和三叠纪两个时代复合碰撞造山构成的 4 000 km 长的中国中央造山带及超高压变质带^[50]。

3.3.2 新特提斯(T₁₋₂—K₁)洋盆演化及俯冲极性

中二叠世—早三叠世开始,联合大陆冈瓦纳陆块北缘的新特提斯洋盆开启和扩张,成为古特提斯洋盆消减的驱动力。班公湖—怒江蛇绿岩带与雅鲁藏布江蛇绿岩研究表明它们分别标志新特提斯北洋盆和新特提斯南大洋的存在。位于

“松潘—羌塘复合增生地体”与“拉萨地体”之间的新特提斯北洋盆开启于早—中三叠世,在晚三叠世洋壳发生俯冲,由于在羌塘地体南缘活动陆缘增生带发育不明显,关于俯冲极性问题由于北侧的活动陆缘带不清楚,而最近又发现拉萨地体中印支火山岛弧带的存在^[75],推测印支火山岛弧带是新特提斯北洋盆(班公湖—怒江洋盆)向南俯冲的结果^[76]。新特提斯北大洋闭合及地体碰撞时间在侏罗纪。

由于雅鲁藏布江蛇绿岩时代提早到晚三叠世(215~195 Ma),潘桂堂等^[78]提出新特提斯南大洋形成时代为晚三叠世—早白垩世。冈底斯火山岛弧带形成初始时期为 J_3-K_1 ,主期为 $K-E_1$,表明新特提斯南大洋(雅鲁藏布蛇绿岩)的初始裂解为 T_3 ,向北俯冲的时间为 J_3-E_1 。因此,新特提斯北大洋的形成、扩张及消减的演化历史比新特提斯南大洋的老。

69 Ma 开始,印度陆块从冈瓦纳大陆裂解,印度洋打开并使印度陆块向亚洲大陆方向推进,新特提斯南大洋的消减和俯冲在主动陆缘的拉萨地体一侧形成白垩—新近纪冈底斯火山岛弧及花岗岩岩带,被称为“转换喜马拉雅带”(Transhimalaya zone)^[77]。约 55 Ma 开始印度大陆与亚洲大陆碰撞形成印度—雅鲁藏布缝合带和“喜马拉雅新生代增生地体”。此时“阿—祁—昆—秦”早古生代复合地体与“松潘—羌塘三叠纪复合增生地体”和“拉萨侏罗纪增生地体”已完全连在一起,拼贴在南亚大陆之上。

3.3.3 洋盆演化、地体增生及大陆生长

综上所述,早古生代始特提斯洋盆形成在冈瓦纳大陆的西侧,中石炭世以来的特提斯洋盆形成在联合大陆的东部,始特提斯洋盆和特提斯洋盆有成因联系,但产生的大背景绝然不同^[58]。“始北中国早古生代复合地体”中的诸地体作为冈瓦纳大陆和始特提斯洋盆之间的多地体/多岛弧群产出,它们之间为一系列具初始洋壳的边缘海盆(类似日本海)相隔,这些边缘海盆与始特提斯洋盆有成因联系,为始特提斯大洋岩石圈板片俯冲造成的上盘活动陆缘增生带上扩张的弧后盆地。

始特提斯→特提斯(古和新)洋盆的转化使羌塘地体和拉萨地体先后从冈瓦纳大陆附近向北运动,由于洋盆的发育一般经历了开启、扩张和消减的过程,一个洋盆的收缩与另一个洋盆的打开在时限上往往具有穿时性,因此新特提斯南大洋的开启与新特提斯北大洋扩张或收缩时期同时,在新特提斯南大洋关闭时保留在缝合带中的早期(T_3)初始洋壳残片是很正常的。

4 造山的高原——青藏高原巨型碰撞造山拼贴体与造山的叠置性

青藏高原形成的基础背景比世界上其他的许多高原都来得复杂,譬如,北美的科罗拉多高原构筑在稳定的古生代地台之上,法国中央高原的基础是欧洲华力西造山带。而青藏高原的前身是早古生代以来形成的巨型复合碰撞造山拼

贴体,因此有人又把青藏高原称为“造山作用的高原”(Orogenic Plateaux)。

青藏高原的地体拼合与碰撞造山作用同时进行,显生宙以来主要的碰撞造山时限为早古生代、三叠纪、晚侏罗—早白垩世和新生代以来。因此青藏高原巨型碰撞造山拼贴体形成主要是 600 Ma 以来长期活动及多期造山的过程,巨型碰撞造山拼贴体的形成是亚洲大陆的自北往南的增生和造山迁移过程的标志。

研究表明全球性造山作用涉及大范围的陆壳变形、变质及花岗岩浆活动,造山作用可以发生在板块碰撞前的俯冲期(俯冲型山链)、主碰撞期(碰撞型山链)及后碰撞期(陆内型山链)。

4.1 早古生代弧—陆碰撞及多地体/岛弧的造山动力学

早古生代时期的地壳变形与碰撞造山事件主要记录在“阿尔金—祁连—昆仑”早古生代复合地体中,但是位于中部和南部的羌塘地体和喜马拉雅地体也曾经历了早古生代或泛非—早古生代造山事件形成原始喜马拉雅山,并成为现今的喜马拉雅造山带的早古生代变质褶皱基底^[79]。因此早古生代造山运动(或泛非—早古生代造山运动)的范围几乎遍及整个青藏高原各地体之中,但是它们的原位在南半球的冈瓦纳大陆周缘的不同部位^[58]。

上述表明青藏北部的早古生代碰撞造山带的形成是由于与始特提斯洋盆有关的边缘海盆(地体/岛弧相间)的闭合而引起,其导致地体/岛弧群的拼合与碰撞,经历了弧/陆和陆/陆碰撞的过程,从俯冲型山链向碰撞型山链转化^[65]。可以看出,柴北缘超高压变质带的形成也起始于边缘海盆初始洋壳的深俯冲作用,而早古生代复合造山带的“三多”的构造格局显示了早古生代造山带形成前的弧后活动带的背景。最近研究提出美洲科迪勒拉造山带是位于弧后及现代弧后域的长期活动带上的造山带,具有长期弱化、低强度、薄和热的岩石圈,由造山带中造山花岗岩基、高级变质作用和韧性变形所指示的造山热能来自原先的弧后热岩石圈,而不是来自于造山变形过程本身^[40]。因此推测青藏高原北部早古生代造山带形成前的广大的活动带是弧后活动带,提供了造山类型转化及陆—陆碰撞强烈造山作用必备的热条件。

4.2 晚古生代(华力西期)的碰撞造山?

前人曾提出东—西昆仑山为华力西期造山带^[70,78]。“十五”青藏高原空白区填图成果中也报道了在布青山以南的南昆仑、北羌塘和西昆仑地区等存在晚古生代地层之间的“角度不整合”,因而晚古生代(华力西期)碰撞造山存在与否成为研究青藏高原碰撞造山作用的值得注视的问题。

碰撞造山事件是以大规模褶皱、伴随的变质作用、区域性角度不整合、大规模的花岗岩浆活动及代表造山结束的磨拉石盆地沉积为标志的。经与有关区调人员最近在成都(会议由潘桂堂主持)讨论初步表明:西昆仑地区的华力西碰撞造山:木孜塔格北 J_1 陆相沉积不整合在 P_2 之上、阿其克库都克 P_1 不整合在 S_{1-2} 之上,克里雅河地区时代没有确定的 T_{1-2}

的磨拉石不整合在 C_3-P_2 弧后盆地沉积之上, 以及朝阳湖 P_3-T_2 与 C_3-P_1 之间砾岩层(性质未定)和上下地层整合的特点, 表明西昆仑华力西碰撞造山运动证据不足; 在东昆仑布青山蛇绿岩以北地区, 局部发现宽缓褶皱的 P_3 灰岩不整合在同劈理褶皱的 $C-P_2$ 板岩夹中基性火山岩之上, 可以解释为洋壳俯冲带上盘 $C-P_2$ 弧前加积楔中存在的局部披盖不整合效应。北羌塘地区发现的局部 P_3 与 $C-P_2$ 之间微角度的不整合可以认为是被动陆缘的伸展不整合的效应。

另外, 前人曾认为东昆仑地区华力西期花岗岩浆活动强烈, 是华力西期洋盆向北俯冲的结果^[70]。经重新测试, 原定为东昆仑布尔汗布达山的“晚古生代”花岗岩, 通过 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $\text{Ar}^{39}-\text{Ar}^{40}$ 年龄的测定(陈文), 获得的绝大部分年龄为三叠纪弧型花岗岩(226~239 Ma), 表明为三叠纪古特提斯洋盆向北俯冲于东昆仑地体之下的结果, 而小范围存在的晚古生代花岗岩可能与后加里东碰撞造成的陆内岩浆活动有关(许志琴等, 未刊资料)。

据古地磁资料表明, 晚泥盆世之后, 始特提斯洋闭合及石炭—二叠纪古特提斯洋打开, 位于冈瓦纳大陆周缘已拼合的“始中国早古生代复合地体”开始往北和北西方向移动, 向联合大陆(Pangeae)靠拢, 直至晚三叠—早侏罗世古特提斯洋盆自东往西逐渐闭合, 南北陆块会聚形成中央碰撞造山带。因此古地磁资料不支持在此之前南北陆块之间碰撞形成华力西造山带的观点(没有碰撞的机会)。

所以, 根据青藏高原现有地质资料分析, 晚古生代不存在以大规模褶皱、伴随的变质作用、区域性广泛角度不整合、大规模的花岗岩浆活动及代表造山结束的磨拉石盆地沉积为标志的碰撞造山运动。

4.3 三叠纪碰撞造山及叠置造山

三叠纪是青藏高原中地体碰撞造山的重要时期。三叠纪的地壳变形主要分布在东—西昆仑地体的南部、巴颜喀拉—松潘甘孜地体、羌塘地体及青藏高原东南部横断山的广大地域, 构成巨型三叠纪碰撞造山带, 由于后期的改造, 三叠纪碰撞造山带几何学呈现“T”形, 由纬向印支带和经向印支带组成。纬向印支带自西往东从西昆仑南部甜水海地体、越过阿尔金断裂连接巴颜喀拉—松潘甘孜、羌塘地体, 向东与南秦岭、大别—苏鲁相连, 全长 3 000 km; 经向印支带自北往南从松潘—甘孜—川滇—印度尼西亚, 全长 2 000 km。

昆南—阿尼玛卿和金沙江蛇绿岩所代表的石炭—二叠纪古特提斯洋盆的闭合造成昆仑、松潘和羌塘 3 个地体与“阿—祁—昆”早古生代复合地体在晚三叠—早侏罗世拼合, 同时形成近东西向的昆仑—松潘—羌塘晚三叠—早侏罗世碰撞造山系。研究表明, 在昆南—阿尼玛卿缝合带北缘的东昆仑主动陆缘一侧发育逆冲—推覆叠置岩片结构, 而在扬子被动陆缘一侧发育新元古代变质基底和盖层之间的韧性挤压型滑脱体系^[73], 两侧都具有向南的造山极性, 并伴随三叠纪以来的花岗岩浆活动。昆南—阿尼玛卿缝合带两侧的“逆冲—滑脱结构”与东秦岭十分类似。

晚侏罗—早白垩世的碰撞造山造成的地壳变形主要分布在青藏联合地体南部的羌塘地体和拉萨地体范围内。

尽管青藏高原中各时期的地体拼合、增生过程与碰撞造山同时进行, 但是碰撞造山作用(包括地壳变形、基底活化及花岗岩浆活动)所涉及范围远远超出地体边界的狭窄地域, 造成叠置造山作用。譬如, 由于古特提斯洋盆闭合形成的强烈印支碰撞造山还影响到东昆仑南缘早古生代复合地体, 形成叠覆造山带。在阿尔金—祁连—昆仑早古生代复合地体的北部, 在早古生代变形之上叠置了印支陆内变形。在东昆仑南地体的万宝沟地区, 早中三叠世地层的同心褶皱叠置在早古生代绿片岩系紧闭褶皱及加里东期花岗岩之上, 羌塘地体玉树以南格拉山的泥盆—石炭纪陆相地层的同心褶皱叠置在早古生代褶皱之上。

4.4 印度/亚洲碰撞及巨大的陆内变形域

青藏高原的形成是地质历史过程中板块或地体连续碰撞和拼合的结果, 最后一次是 60~50 Ma 以来的印度/亚洲碰撞。目前, 绝大多数人接受了青藏高原的隆升是印度板块与亚洲大陆碰撞的结果的观点^{[30][80]}。研究表明, 印度/亚洲大陆碰撞之后, 板块之间的作用并未终止, 印度板块仍以 44~50 mm/a 的速率往北推进, 至少 1 500 km 的南北向缩短量被吸收, 使青藏高原成为 2 倍于正常地壳厚度的巨厚陆壳体, 并形成印度与西伯利亚板块之间南北 2 000 km、东西 3 000 km 巨大范围的新生代陆内变形域^[29, 81-82]。现今青藏高原南部喜马拉雅的南北向缩短率为 18 mm/a, 北部祁连山的缩短率为 15 mm/a, 腹地的东西向伸展速率为 10 mm/a^[83], 由此形成了“中央高原”和“周缘造山带”两个新生代青藏高原特级大地构造单元。

4.4.1 大印度板块变成小印度板块

印度/亚洲大陆碰撞之前比现在的范围大得多的印度板块(即大印度板块)往北相对南亚大陆运动了 2 500 km^[84-85], 由于沿着走滑断裂往北运移的速度的差异, 大印度板块东西两端与南亚大陆的碰撞产生了时间上的先后: 西端的碰撞在 52 Ma(可能更早), 东端的碰撞大约 45 Ma, 比西端晚了 10 Ma。印度板块的东西界分别为两条大型的走滑断裂: 西界是恰曼(Chaman)左行走滑断裂, 东界是沙盖—明袞(Sagaing—Minggun)右行走滑断裂, 这两条断裂都伴随强烈褶皱, 水平位移至少 1 000 km, 这些构造形成了著名的两个喜马拉雅东西构造结: 南迦帕巴(Nanga Parbat)西构造结和布玛(Burma)东构造结^[86]。

4.4.2 巨大的弧后变形域

新特提斯洋盆往北俯冲形成的冈底斯岩浆岛弧带作为活动增生陆缘带拼贴在拉萨地体之上, 冈底斯岩浆岛弧带以北的广大地域都可以看作弧后域。由于印度/亚洲碰撞产生的大规模的变形及主要构造事件表现为: 弧后地域(青藏腹地)的裂谷伸展作用和大规模碱性火山活动, 周缘造山带的挤压逆冲变形及垂向挤出, 地体边界(或古构造带的再活化)以及斜向碰撞形成的大型走滑断裂以及大量物质向东和南

东方向的侧向挤出,而北部广大地区除地体边界外则表现为弥散的弱变形。周边克拉通上的陆相盆地的形成与高原隆升及周缘造山带崛起呈互馈关系。

4.4.3 周缘现代造山带的崛起和喜马拉雅造山机制

印度/亚洲碰撞造山的巨大影响使喜马拉雅增生地体最后崛起,喜马拉雅山的最后形成是30 Ma以来印度板块往北陆内俯冲在亚洲大陆之下的结果^[87],与此同时的北缘、东缘和西缘周边造山带以不同的挤出样式:东缘龙门山和西北缘阿尔金山的“挤压转换—逆冲式”及东北缘祁连山“双向逆冲式”崛起^[88]。最新的研究^[89]表明,高喜马拉雅(GHM)亚地体北缘的藏南拆离断裂(STD)向北延伸在特提斯—喜马拉雅(THM)亚地体之下,与自南而北剪切滑移的康马—拉轨岗日拆离带(KLDT)相连。由于拆离构造作用同时及稍后形成的淡色花岗岩的侵位使康马—拉轨岗日拆离带隆起,形成康马—拉轨岗日穹隆带。在高喜马拉雅(GHM)亚地体南部发育的逆冲断层具有挤压转换性质,在北部发现EW向近水平的韧性拆离构造,以发育EW向拉伸线理及缓倾的糜棱面理和自西向东水平滑移的剪切指向为特征。提出高喜马拉雅(GHM)亚地体的EW向水平滑移是垂向挤出和侧向挤出的变形综合反映。喜马拉雅地体中的东西和南北向拆离构造的存在为喜马拉雅现代造山机制提供了再讨论的基础^[90]。

5 大型走滑构造对青藏高原地体结构的改造

青藏高原的几何学形态十分奇特,这与大型走滑构造对青藏高原中先后形成的拼合地体和碰撞造山系的重要制约、改造以及碰撞造成的青藏高原东南缘大量物质向SE及S方向逃逸(侧向挤出)^[90-94]有关。

青藏高原中不同历史时期形成的大型走滑构造主要有两类,一类是产于地壳深部的韧性走滑剪切带,由于后期的抬升而出露地表,包括400 Ma左右前形成的北祁连南缘韧性右行走滑剪切带和西昆仑康西瓦韧性右行走滑剪切带^[73,95-96],240~220 Ma前形成的南祁连南缘韧性左行走滑剪切带^[73]、东昆仑韧性左行走滑剪切带^[95]、金沙江韧性左行走滑剪切带及阿尔金韧性左行走滑剪切带^[96];20 Ma前后形成的鲜水河韧性左行走滑剪切带^[73]、喀喇昆仑韧性右行走滑剪切带和红河韧性右行走滑剪切带^[97]等。其中阿尔金韧性左行走滑剪切带是中亚最大的走滑构造带,南祁连南缘韧性左行走滑剪切带向东沿至东秦岭可能和丹凤韧性左行走滑剪切带相连,全长2500 km。这些地壳深部的韧性走滑剪切带在后期抬升过程中,由韧性→脆性→脆性应变变化。另一类是产于地壳浅部的脆性走滑断裂,如海源左行走滑断裂^[98]等。在印度/亚洲碰撞以来大型韧性走滑构造主要发育在高原南部,而且在喜马拉雅的东、西两侧,如喀喇昆仑韧性右行走滑断裂、嘉黎—高黎贡山韧性右行走滑断裂、红河韧性右行走滑断裂和鲜水河韧性左行走滑断裂;其他地区特别是北部以脆性断裂为主,表现为古韧性剪切带的再活动及新生断裂,如阿尔金左

行走滑断裂、东昆仑左行走滑断裂、雅鲁藏布江右行走滑断裂和海源左行走滑断裂。

大型走滑构造在青藏高原地体拼合及碰撞造山中的作用主要表现如下:

5.1 地体的相对位移及斜向碰撞

位于地体边界的走滑构造使地体相对位移,是地体斜向碰撞的产物。如400 Ma左右形成的北祁连南缘韧性右行走滑剪切带,是阿拉善地体与祁连地体拼合碰撞后期的斜向碰撞导致两地体相对位移的结果;昆南韧性左行走滑剪切带使东昆仑地体和松潘地体相对位移数十千米,反映了晚三叠世—早侏罗世阶段地体斜向碰撞的影响。

5.2 地体错位及移置

与青藏高原北部“阿—祁—昆”早古生代复合地体及“松潘—羌塘”三叠纪复合增生地体斜交的阿尔金主断裂(NEE—SWW走向)是中亚最大的走滑断裂,研究表明阿尔金地体与祁连地体具可对比性,阿尔金地体为祁连加里东造山带的西延部分。它与祁连加里东造山带的分开是由于印支期(240~220 Ma)开始的阿尔金主断裂的左行走滑运动及之后多期再活动的结果。根据断裂两侧构造单元及地体边界特征的详细对比,已提出沿阿尔金主断裂两侧的北阿尔金俯冲杂岩带与北祁连俯冲杂岩带的累计错距350 km,南阿尔金俯冲杂岩带与柴北缘俯冲杂岩带的累计错距400 km,沿阿尔金断裂北缘的若羌断裂可能平移200 km的认识^[99]。阿尔金断裂现今的走滑速率:北东段5 mm/a,中段20 mm/a和西段30 mm/a,使阿尔金地体和西昆仑地体成为现在的移置地体。

位于青藏高原西南缘的喀喇昆仑右行走滑断裂的活动时间开始于23~27 Ma以前,比前人的看法(8~11 Ma)提前。目前对于断裂的累积位移量的估算存在着较大的分歧(~300~66 km)^[100]。根据笔者以断裂两侧的地体边界为标志的研究,认为班公缝合带相对阿克拜塔尔缝合带右行位移400 km,狮泉河缝合带相对什约克缝合带右行位移280 km,累计走滑位移量至少在250~300 km以上。最新的研究还表明,喀喇昆仑断裂形成以来的长期的平均滑移速率为 10 ± 3 mm/a,说明从印度板块与欧亚大陆碰撞后,青藏高原西南缘约27 Ma以来产生大规模右旋走滑,使得高原物质沿这一滑移线以约10 mm/a滑移速率向东挤出^[101]。

5.3 地体的侧向挤出

在印度陆块楔与南欧亚大陆碰撞同时,大规模的走滑作用使南欧亚大陆南部的松潘、羌塘和冈底斯地体向东南方向强烈侧向挤出,构成“云南挤出地体”和“禅邦挤出地体”(图1),而制约块体挤出的主要走滑断裂(或韧性走滑剪切带)为鲜水河韧性左行走滑剪切带、嘉黎—红河韧性走滑剪切带、雅鲁藏布江右行走滑断裂等(图2)。

6 青藏高原隆升的多元深部驱动力

自上世纪90年代初以来,由许志琴、杨经绥、姜枚和P.

Tapponnier组织的中法青藏高原地学合作开展了地质和地球物理多学科的研究和探测。其中姜枚和 Him 及 Wittlinger 负责的中法地球物理合作小组在青藏高原实施了 8 000 km 长的天然地震探测剖面,包括横穿青藏高原中部及南部的格尔木—唐古拉—嘎拉剖面(3 000 km),位于青藏高原腹地东部的共和—玉树剖面(3 000 km),横穿青藏高原西北部柴达木盆地和阿尔金山的乌图美仁—若羌剖面(1 000 km),以及横穿青藏高原西部昆仑山的叶城—狮泉河剖面(1 000 km)。这些剖面几乎穿过了青藏高原所有地体,并通过了主要地体边界,获得地壳和地幔速度图像及地震波各向异性,揭示了青藏高原 400 km 深度范围内的地幔结构特征:(1) 青藏高原地体的地壳结构及复杂流变学特征;(2) 青藏高原腹地可可西里下面的深地幔羽存在;(3) 大型走滑断裂为超岩石圈或地幔剪切带;(4) 古大洋岩石圈“化石”残片与拆沉的地球物理证据;(5) 印度大陆岩石圈板片俯冲的样式和距离等,为人们提供了讨论有关青藏高原深部地壳、岩石圈以及深地幔结构的背景资料^[36,102-106]。

青藏高原各地体的厚度及地壳平均地震波速度特征反映了拼合的各地体的物质组成、结构差异及低速层的存在;400 km 深度范围内的地幔速度图像揭示了青藏高原腹地深地幔中存在以大型低速异常体为特征的地幔羽,并通过热通道与可可西里地表大面积分布的新生代高钾碱性火山作用有成因联系;伸入>200 km 以下的 5 条伴有局部熔融及高热物质的垂向低速异常带代表了大型超岩石圈或地幔剪切带;数条不连续的高速异常带被解释为地体拼合历史过程中可能保留的大洋或大陆岩石圈化石残片,是“拆沉”的地球物理依据;由巨大的断续高速异常带(厚 100~300 km)组成的印度岩石圈板片往北缓缓地插入雅鲁藏布江缝合带以北 400 km 远的唐古拉山之下,并被若干条深达 400 km 以上的垂向低速异常带切割^[106]。

最近以 S.P. Grandt^[107], R. Van Der Voo et al^[41], S. Widiyantoro^[108]和 H. Biggaard^[38]等为首的科学家通过对最新的全球地震层析资料所揭示的地幔中地震波速变化的研究,发现有的板块可以俯冲到过去不可想象的核幔边界(2 891 km 深)。在大陆板块会聚边界,地幔地震层析图像不仅显示了岩石圈板片的超深俯冲,还保存了拆沉的岩石圈化石残片的重要信息。通过印度、西藏及邻近印度洋的西喜马拉雅地幔层析剖面^[38,41]揭示了若干高速异常体的存在。在东北阿富汗的兴都库什的上地幔 600 km 范围内,高速板片向北倾斜并与印度板块岩石圈连接;在北巴基斯坦,同样的高速板片显示了印度板片以“翻转”几何形态俯冲至 800~1 000 km 的地幔深度,并发现印度次大陆之下 1 000~2 300 km 深度范围内出现与浅部异常体分离的高速异常体,甚至掉到核幔边界的深度。R. V. der Voo 等^[41]把这些下地幔中的高速异常体解释为拆沉的新特提斯大洋岩石圈残片。这一新的信息为青藏高原形成的深部驱动力探究提供了新的思考。

结合有关的青藏高原深部探测资料,讨论青藏高原隆升的多元深部驱动力的几个问题:

(1) 印度岩石圈板片俯冲样式和俯冲深度。印度和欧亚板块碰撞及青藏高原形成的研究一直是地学界关注的热点。自 Argand E. 提出印度板块往北俯冲在欧亚大陆之下的观点以来,地球物理的探测不断提供了岩石圈范围内的俯冲证据^[109-112]。印度岩石圈板块究竟往北俯冲多远,以何种样式俯冲,是印度/亚洲碰撞及青藏高原隆升的重要制约因素。长期以来各种推测和讨论都是以岩石圈尺度所获得的地球物理资料为依据的。横越西—中喜马拉雅的地震层析剖面^[38,41]揭示了印度岩石圈板块往北以特殊的样式超深俯冲于青藏高原之下,即印度岩石圈俯冲板片的上部往北缓倾、中部直立向下以及下部往南翻转的几何学形式^[87];喜马拉雅的地幔地震层析图像中还揭示了中下地幔范围内保存了若干高速异常体,说明岩石圈板片可以俯冲到地幔深部,一部分成为拆沉的化石残片,一部分在碰撞的过程中折返上来,折返上来的板片保存了大量地幔动力学的信息,包括超高压变质岩石的发现^[113]。

横穿青藏高原的地震层析资料研究进一步表明,在翻卷板片的上部(400 km 以上),代表印度岩石圈板块的高喜马拉雅高速异常带以缓倾角度俯冲至雅鲁藏布江缝合带以北 400 km 远的唐古拉山下面,切割印度岩石圈板片的垂向低速异常带解释为印度岩石圈翻卷板片造成的地幔上升熔融柱,这些上升的熔融柱在印度岩石圈板片上部组成以低速异常层为特征的地壳熔融层。

(2) 青藏高原周缘古老变质体的挤出及北缘克拉通的陆内俯冲。青藏高原周缘高耸的山峰构成了高原的屏障,南缘为喜马拉雅山,东缘为龙门山—锦屏山,北缘和西缘为祁连山—阿尔金山—西昆仑山,山脉的外围是稳定地块之上的前陆沉积盆地。青藏高原的周缘造山带是如何在新生代崛起?原来埋在深部的岩石为什么快速折返到地表形成高山?深部的驱动力是什么?

在大约 55 Ma, 印度板块与亚洲大陆碰撞之前比现在的范围大得多的印度板块(即大印度板块)往北相对南亚大陆运动了 2 500 km^[25,84-85]。由于沿着走滑断裂往北运移的速度的差异,大印度板块东西两端与南亚大陆的碰撞产生了时间上的先后:西端的碰撞在 52 Ma(可能更早),东端的碰撞大约 45 Ma^[28],晚了 10 Ma。印度板块的向北推挤导致喜马拉雅增生地体的形成与喜马拉雅山脉的崛起,缩短率为 18%,之间会聚与碰撞方式是以挤压为主,构造造型是从雅鲁藏布缝合带逐步往南扩展的逆冲叠覆作用为特征,因此印度板块北部被动陆缘的变质基底及古生代—中生代沉积盖层均卷入地壳增生楔中。在 60~50 Ma 形成雅鲁藏布江主幔逆冲断层,40 Ma 形成特提斯喜马拉雅的北喜马拉雅逆冲断层,20 Ma 同时形成高喜马拉雅和低喜马拉雅之间的主中夹冲断层(MCT)和高喜马拉雅与特提斯喜马拉雅之间的藏南拆离断

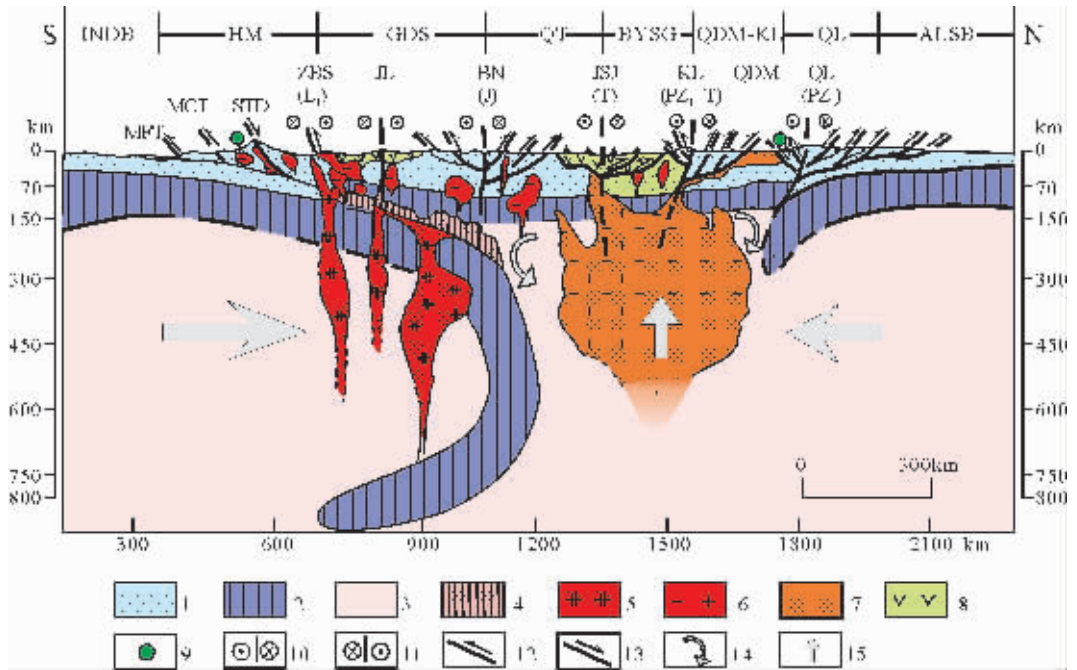


图3 青藏高原深地幔结构及动力学模式图

1—地壳;2—岩石圈地幔;3—软流圈;4—局部熔融体;5—深部熔融体;6—花岗岩;7—地幔底辟;8—火山岩;9—超高压变质岩石;
10—左行走滑断裂;11—右行走滑断裂;12—逆冲断裂;13—正断层;14—挤压力;15—上升力。

IND—印度陆块;HM—喜马拉雅增生地体;GDS—冈底斯地体;QT—羌塘地体;BYSG—巴颜喀拉—松潘甘孜地体;QDM— KL—柴达木—昆仑地体;QL—祁连地体;ALSB—阿拉善陆块;MFT—主前鋒逆冲断裂;MCT—主中央冲断裂;STD—藏南拆离断裂;ZBS—藏布缝合带;JL—嘉黎断裂;BN—班公湖—怒江缝合带;JSJ—金沙江缝合带;KL—昆仑断裂;QDM—柴达木地体

Fig.3 Deep mantle structure and dynamic model of the Qinghai-Tibet Plateau

1—Crust;2—Lithospheric mantle;3—Asthenosphere;4—Partial melt;5—Deep melt;6—Granite;7—Mantle diapir;8—Volcanic rocks;9—Ultra-high pressure metamorphic rocks;10—Sinistral strike-slip fault;11—Dextral strike-slip fault;12—Thrust;13—Normal fault;14—Compression;15—Uplifting force

IND—Indian block;HM—Himalaya accretionary terrane;GDS—Gangdise terrane;QT—Qiangtang terrane;BYSG—Bayan Har— Songpan—Garzè terrane; QDM— KL—Qaidam—Kunlun terrane;QL—Qilian terrane;ALSB—Alxa block;MFT—Main Front Thrust;MCT—Main Central Thrust; STD—South Tibet detachment;ZBS—Zangbo suture;JL—Lhari fault;BN—Bangong Co—Nujiang suture; JSJ—Jinshajiang suture;KL—Kunlun fault;QDM—Qaidam terrane

裂(STD)。在MCT和STD的制约下,高喜马拉雅古老变质体从下地壳呈挤出样式折返。

青藏高原北部周缘克拉通向南的陆内浅俯冲作用使高原北缘的祁连山—阿尔金山—西昆仑山在地壳的强烈挤压下以“双向式逆冲挤出”样式和“逆冲转换挤出”样式缩短并崛起。河西走廊—北祁连地震反射剖面^[33]和乌图美仁—若羌天然地震层析剖面^[102,105]提供了陆内俯冲的证据,叶城—狮泉河剖面也显示了塔里木地块向南俯冲于西昆仑之下。

(3)岩石圈—地幔剪切带与“右旋隆升”的新机制。根据青藏高原大型走滑断裂研究已提出青藏高原向NE方向的“右旋隆升”新机制^[94],新的地震层析资料表明青藏高原新生代活动的走滑断裂大部分为岩石圈—地幔剪切带,因此可以认为

高原“右旋隆升”的机制受到岩石圈—地幔断裂的制约。笔者认为在青藏高原腹地的上地幔剪切波各向异性方向自西往东从EW→NE→SE→NNE→SSW的转化与“右旋隆升”的观点相吻合。

(4)青藏高原腹地深部的热结构及地幔羽。位于青藏高原腹地100 km深度以下的巨型地幔羽与可可西里火山作用有成因联系,表明青藏高原腹地深部具有热结构,青藏高原南缘的陆内超深俯冲与北缘的陆内浅俯冲对高原产生南北向挤压及东西向拉伸,深部挤压环境导致物质熔融和地幔羽的形成,以及物质在地幔中的向东运动,浅部东西向拉伸环境造成南北向裂谷及腹地的火山喷发。格尔木—唐古拉天然地震探测剖面及根据其周围资料从新处理获得的阿克

塞—花石峡天然地震探测剖面还揭示了可可西里为中心的由大型低速异常体组成深部地幔羽结构(深度 150~400 km 以下)的存在^[38-39],并且在柴达木盆地下部发现宽 300 km、厚 80 km 的地震波低速异常层,该地震波低速异常层又与可可西里深部大型低速异常体组成地幔羽相连^[114]。

许志琴^[89]曾提出青藏高原隆升的“周缘陆内俯冲及内部地幔底辟”的碰撞动力学机制模型。根据新的地震层析资料及地震反射资料,对上述模式应作进一步修改,新的模式可归结为“青藏高原南部印度岩石圈板片的陆内超深俯冲,北缘克拉通的陆内浅俯冲,腹地深地幔热结构以及超岩石圈范围的“右旋隆升”及物质向东挤出”(图 3)。

青藏高原大陆动力学的研究刚刚开始,笔者在本文中提出的浅见愿与同仁们讨论。

鸣谢: 本文为笔者等近 15 年青藏高原研究的部分成果综述。在成文过程中向 M.Mattauer 教授、肖序常院士、莫宣学教授、潘桂堂研究员等请教,受益匪浅。图件由张晓伟绘制,唐哲民、蔡志慧协助整理参考文献,一并感谢。

参考文献 (References):

- [1] Suess E. Das Antlitz der Erde. 1888, 2. Wien;F. Tempsky.
- [2] Suess E. Das Antlitz der Erde. 1901a, 3, pt. 1. Wien;F. Tempsky.
- [3] Suess E. Abschieds-Vorlesung der Professors Eduard Suess:Beitrage zur Palaontologie und Geologie Osterreich-Ungarns and des Orients. 1901b,14;1~18.
- [4] Suess E. Das Antlitz der Erde, v. III 2(Dritter band.Zweite Halfte. Schluss des Gesamtwerkes).1909.Wien;F.Tempsky,and Leipzig;G. Freytag.
- [5] Suess E. Uber die Donau.Vortrag gehalten in der a.o.Festversammlung der k.Akad.Wiss.am 9.Marz 1911.Wien;Alfred Holder.
- [6] De Launay L. La Géologie et les Richesses Minerales de L'Asie Historique- Industrie- Production- Avenir-metallogenie- Sibérie- Oural-Caucase-Turkestan-Mer Egee-Asie-Mineure-Perse-Inde-Insulinde-IndoChine-Japon,etc. Paris;Ch.Beranger.1911.
- [7] Leuchs, K.Beitrage zur Geologie des westlichen Kwenlun und Westtibets, nach Zugmayer's Beobachtungen. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft[J]. Monatshefte.1913.65;173~185.
- [8] Argand E. La tectonique de l'Asie. In;Congres Géologique International, Comptes Rendus de la XIIIe Session,premier fascicule[M]. Liege;Vaillant-Carmanne,1924.
- [9] Fromaget J.Etudes géologiques sur le nord de L'Indochine centrale. Theses présentées a la Faculté des Sciences de L'Université de Lyon pour obtenir le grade de Docteur de L'Université de Lyon [M]. Hanoi;imprimerie de L'Extreme Orient,1927.
- [10] Dainelli G. La Serie dei Terreni, parte prima. Spedizione Cinese (1913-1914).Serie II Risultati Geologici e Geografici,vol.2. Publication sotto la direzione di Giotto Dainelli,Bologna;Nicola Zanichelli,1933.
- [11] Huang T K. An outline of the tectonic characteristics of China [J]. Eclogae Geol. Helv. 1978, 71:611~635.
- [12] Huang T K,Chen B W. The Evolution of the Tethys in China and Adjacent Regions (English and Chinese bilingual text) [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1987.
- [13] 肖序常,李廷栋,李光芹,等.喜马拉雅岩石圈构造演化[M].北京:地质出版社,1988.
- Xiao Xuchang,Li Tingdong,Li Guangqin,et al.Tectonic Evolution of the Crust-upper Mantle of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau [M].Beijing:Geological Publishing House, 1988 (in Chinese with English abstract).
- [14] 肖序常,李廷栋.青藏高原的构造演化与隆升机制[M].广州:广东科技出版社,2000.
- Xiao Xuchang,Li Tingdong.Tectonic Evolution and Uplift of Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau [M].Guangzhou:Guangdong Science & Technology Press, 2000(in Chinese with English abstract).
- [15] Chang C F, Pan, Y S, Sury Y Y. The tectonic evolution of the Qinghai-Tibet plateau;a review[A]. In;Sengor A M C (ed.). The Tectonic Evolution of the Tethyanians [C]. Dordrecht;Kluwer, 1989. 415~476.
- [16] 潘裕生.喀喇崑崙山-昆崙山地区地质演化[M].北京:科学出版社,2000. 525.
- Pan Yusheng.Geological Evolution of the Karakrum-Kunlun Mountains[M].Beijing:Science Press,2000. 525(in Chinese).
- [17] 钟大赉.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998. 1~231.
- Zhong Da lai.Paleotethyan Orogenic Belt in Yunnan-Western Sichuan[M].Beijing:Science Press,1998. 1~231(in Chinese).
- [18] 潘桂堂,李兴振,王立金.青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J].地质通报,2002,21(11):701~707.
- Pan Guitang,Li Xingzhen,Wang Lijin,et al.Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet plateau and its adjacent regions [J]. Geological Bulletin of China, 2002,21 (11):701~707(in Chinese with English abstract).
- [19] Courtillot V, Besse J, Vandamme D,et al. Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? [J]. Earth Planet.Sci. Lett, 1986, 80;361~374.
- [20] Jaeger J J, Courtillot V, Tapponnier P. Paelontological view of the ages of the Deccan Traps,the Cretaceous/tertiary boundary,and the India/Asia collision[J]. Geology, 1989,17:316~319.
- [21] Searle M P.Tigraphy,structure and evolution of the Tibetan-Tthys zone in Zanskar and the Indus suture zone in the Ladakh Himalaya [J].Trans. R. Soc.Edinburgh Earth Sci., 1983, 73:205~219.
- [22] Searle M P, Windley B F, Coward M P, et al. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya [J]. Geol.Soc.Am.Bull., 1987,98;678~701.
- [23] Treloar P J, Coward M P. Indian plate motion and shape:Constraints on the geometry of the Himalaya orogen [J].Tectonophysics, 1991, 191:189~198.
- [24] Dewey J F, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the India-Eurasia collision zone [J]. Eclogae. Geol. Helv., 1989,82;

- 717~734.
- [25] Besse J V, Courtillot J P, Pozzi M, et al. Paleomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture [J]. *Nature*, 1984, 311:621~626.
- [26] Critelli S, Garzanti E. Provenance of the Lower Tertiary Murree redbeds (Hazara-Kashmir syntaxis, Pakistan) and initial rising of the Himalayas [J]. *Sediment. Geology*, 1994, 89:265~284.
- [27] Le Pichon X, Fournier M, Jolivet L. Kinematics, topography and extrusion in the India-Eurasia collision [J]. *Tectonics*, 1992, 11:1085~1098.
- [28] Rowley D B. Age of initiation of collision between India and Asia: a review of stratigraphic data [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, 145:1~13.
- [29] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. *Science*, 1975, 189:419~426.
- [30] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo A. On the mechanics of the collision between India and Asia, in *Collision Tectonics* [A]. In: Coward M P and Riess A C (ed.). *Geol. Soc. Spec. Publ. (C)*. London, 1986, 19:115~157.
- [31] Barazangi M, Ni J. Propagation characteristics of Pn beneath the Himalayan arc and Tibetan plateau: possible evidence for underthrusting of Indian continental lithosphere beneath Tibet [J]. *Geology*, 1982, 10:179~185.
- [32] 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞. 青藏高原南北地壳幔热结构差异的大地热流证据 [J]. *中国地质科学院院报*, 1990, 21:203~214.
Shen Xianjie, Zhang Wenren, Yang Shuzhen, et al. Heat flow evidence for the differentiated crust-mantle thermal structures of the northern and southern terranes of the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1990, 21:203~214 (in Chinese with English abstract).
- [33] 吴宣志, 吴春玲, 卢杰. 利用深地震反射研究北祁连-河西走廊地壳细结构 [J]. *地球物理学报*, 38(增刊 II), 1995, 29~35.
Wu Xuanchi, Wu Chunling, Lu Jie. Research on the fine crustal structure of the northern Qilian-Hexi corridor by deep seismic reflection [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 38, 1995, 29~35 (in Chinese with English abstract).
- [34] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面 [J]. *科学通报*, 2000, 45(17):1874~1879.
Gao Rui, Huang Dongding, Lu Deyuan, et al. Deep seismic reflection profile across Juncture zone between Tarim basin and west Kunlun Mountain [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(17):1874~1879 (in Chinese with English abstract).
- [35] 滕吉文, 王绍舟, 姚振兴. 青藏高原及其邻近地区的地球物理场特征与大陆板块构造 [J]. *地球物理学报*, 1980, 23(3):254~268.
Teng Jiwen, Wang Shaozhou, Yao Zhenxing. Characteristics of the geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang plateau and its neighbouring regions [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1980, 23(3):254~268 (in Chinese with English abstract).
- [36] 姜枚, 吕庆田, 史大年, 等. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构 [J]. *地球物理学报*, 1996, 39(4):470~481.
Jiang Mei, Lu Qingtian, Shi Danian, et al. The study on the structure of crust and upper mantle with natural earthquakes in central Tibetan plateau [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39(4):470~481 (in Chinese with English abstract).
- [37] Bigwaard H, Sjakman, Win. Closing the gap between regional and global travel tomography [J]. *Journ. Geoph. Res.*, 1998, 103: 30055~30078.
- [38] Xu Z Q, Jiang M, Yang J S, et al. Mantle diapir inward intracontinental subduction: A discussion on the mechanism of uplift of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 1999, 328:19~31.
- [39] Dewey J F. Orogeny can be very short [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2005, 102:15286~15293.
- [40] Hyndman R D, Currie C A, Mazzotti S P. Subduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat [J]. *GSA Today*, 2005, 15(15):4~10.
- [41] Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Mesozoic subducted slabs under Siberia [J]. *Nature*, 1999, 397:246~249.
- [42] Pognante U, Spencer D A. First record of eclogites from the High Himalayan belt, Kaghan valley (northern Pakistan) [J]. *Eur. J. Mineral.*, 1991, 3(3):613~618.
- [43] Guillot S, de Sigoyer J, Lardeaux J M, et al. Eclogitic metasediments from the Tso Moriri area (Ladakh, Himalaya): Evidence for continental subduction during India-Asia convergence [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1997, 128:197~212.
- [44] David G Howell. *Terrane Tectonics - Mountain Building Continental Growth?* [M]. 1983.
- [45] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 论地体构造-板块构造理论研究的最新问题 [J]. *中国地质科学院院报*, 1984, (10):27~34.
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. On terrane-A latest concept in the study of plate tectonics [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1984, (10):27~34 (in Chinese with English abstract).
- [46] Cong B L. *Ultrahigh - Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan -Sulu Region of China* [M]. Beijing: Science Press, 1996. 1~224.
- [47] Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, et al. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. In: *Ultrahigh-pressure mineralogy; physics and chemistry of the Earth's deep interior* [A]. In: Hemley R J (ed.). *Reviews in Mineralogy* [C]. Washington D. C.: Mineralogical Society of America, 1998. 37:33~96.
- [48] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物——柯石英 [J]. *地质学报*, 2001, 75(2):175~179.
Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, et al. Discovery of Coesite in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-UHP) metamorphic belt, NW China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 75(2):175~179 (in Chinese with English abstract).
- [49] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义 [J]. *科学通报*, 1998, 43(14):1544~1549.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, et al. Discovery of Eclogite in

- the North Qaidam and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (14):1544~1549 (in Chinese with English abstract).
- [50] 杨经绥,许志琴,宋述光,等.青海都兰地区榴辉岩的发现及对中国中央造山带高压-超高压变质带研究的意义 [J].地质学报, 2000,74 (2):156~168.
- Yang Jingsui,Xu Zhiqin,Song Shuguang, et al.Discovery of Eclogite in Dulan,Qinghai Province and its significance for studing the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2000,74 (2):156~168 (in Chinese with English abstract).
- [51] 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——阿尔金中加里东期山根存在的证据[J].科学通报, 1999, 44 (10):1109~1112.
- Zhang Jianxin,Zhang Zemin, Xu Zhiqin, et al.The ages of Sm-Nd and U-Pb of eclogite from the west Altyn tectonic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (10):1109~1112 (in Chinese with English abstract).
- [52] 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.
- Zhang Jianxin,Yang Jingsui,Xu Zhiqin, et al.Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin,north-western China:Evidences from U -Pb and Ar -Ar dates [J]. Geochimica, 2000,29(3):217~222 (in Chinese with English abstract).
- [53] 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.
- Zhang Jianxin,Yang Jingsui,Xu Zhiqin, et al. Evidence of UHP metamorphism in eclogite of Altyn mountain [J]. Chinese Science Bulletin,2002,47(3):231~234.
- [54] Xu Zhiqin, et al. Abstract for AGU Fall Meeting,2005.
- [55] Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Wu Cailai, et al. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt [J]. JAES, 2006 (in press).
- [56] Chemenda A I, Burg P, Mattauer M. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system;geopoeim based on new modeling,geological and geophysical data[J]. Earth Planet. Sci. Lett. 2000, 174:397~409.
- [57] 李才,翟庆国,程立人,等.青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考[J].地质通报,2005, 24(4):295~301.
- Li Cai,Zhai Qingguo,Cheng Liren,et al.Thought on some key geological problems in the Qiangtang area,Qinghai-Tibet plateau [J]. Geological Bulletin of China,2005, 24 (4):295~301 (in Chinese with English abstract).
- [58] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A Geologic Time Scale[M]. New York :Columbia University Press, 2004.
- [59] 夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山海相火山岩岩石成因[M].北京:地质出版社,1996.
- Xia Linqi,Xia Zuchun,Xu Xueyi.Genetic Environments of Early Paleozoic Marine Volcanics of North Qilian [M].Beijing:Geological Publishing House,1996(in Chinese with English abstract).
- [60] 史仁灯,杨经绥,吴才来,等.北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据[J].地质学报,2004b, 78(5):649~657.
- Shi Rendeng,Yang Jingsui,Wu Cailai,et al.First SHRIMP dating for the formation of the Late Sinian Yushigou ophiolite,North Qilian mountains [J].Acta Geoscientica Sinica,2004b,78 (5):649~657 (in Chinese with English abstract).
- [61] 刘良,车自成,王焰,等.阿尔金高压变质带的特征及其构造意义 [J].岩石学报,1999,15(1):57~64.
- Liu liang,Che Zicheng,Wang Yan, et al.Character and tectonic significance of Altun high pressure metamorphic belt [J].Acta Petrologica Sinica ,1999,15(1):57~64(in Chinese with English abstract).
- [62] 史仁登,杨经绥,吴才来,等.柴北缘超高压变质带中的岛弧火山岩[J].地质学报,2004,78(1):53~64.
- Shi Rendeng,Yang Jingsui,Wu Cailai,et al.Island arc volcanic rocks in the north Qaidam UHP metamorphic belt[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004,78(1):53~64(in Chinese with English abstract).
- [63] 肖序常,王军,苏犁,等.再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义 [J].地质通报,2003, 22(10):745~750.
- Xiao Xuchang,Wang Jun,Su Li,et al.A further discussion of the Kuda ophiolite,West Kunlun,and its tectonic significance [J].Geological Bulletin of China,2003, 22(10):745~750 (in Chinese with English abstract).
- [64] 许志琴,徐惠芬,张建新,等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩石地体及动力学 [J].地质学报, 1994, 69(1):1~14.
- Xu Zhiqin,Xu Huifen,Zhang Jianxin,et al.The Zhoulangnashan Caledonian subductive complex in the northern Qilian Mountains and its dynamics [J].Acta Geologica Sinica, 1994, 69 (1):1~14 (in Chinese with English abstract).
- [65] Xu Z Q, Zhang J X, Li H B. Architecture and orogeny of the Northern Qilian Orogenic Belt, Northwestern China [J]. Journal of the Geological Society of China, 2000,43:125~141.
- [66] 李怀坤,陆松年,赵风清,等.柴达木北缘新元古代重大地质事件年代格架 [J].现代地质, 1999, 13(2):224~225.
- Li Huaikun,Lu Songnian,Zhao Fengqing,et al.Geochemical framework of the Neoproterozoic major geological events in the northern margin of the Qaidam basin [J].Geoscience, 1999, 13(2):224~225 (in Chinese with English abstract).
- [67] Yang J S, Xu Z Q, Li H B, et al, A Caledonian convergent border along the Qilian terraine, NW China:Evidence From eclogite, garnet-peridotite, ophiolite, and S-type granite [J]. J. of the Geological Society of China, 2000, 43(1):142~160.
- [68] Sengor A M Celai. Tethyan evolution of Turkey:A plate tectonic approach [J]. Tectonophysics, 1981, 75(3-4):181~190.
- [69] Sengor A M Celai, Plate tectonics and orogenic research after 25 years:A Tethyan Perspwtive [J]. Earth-Sacience Reviews, 1990, 27(1-2):1~34.
- [70] 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等.昆仑开合构造 [M].北京:地质出版社, 1992.

- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, et al. Opening - Closing Tectonics of Kunlun Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992 (in Chinese with English abstract).
- [71] Yang J S, Robison P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1996, 258:215~231.
- [72] 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: 一个被支解了的古特提斯洋壳[J]. *中国地质*, 2004, 31(3): 226~229.
- 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): 226~229 (in Chinese with English abstract).
- [73] 许志琴, 候立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1~190.
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, et al. Orogenic Processes of the Songpan-Garze Orogenic Belt of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1~190 (in Chinese with English abstract).
- [74] 刘福来, 许志琴, 宋彪. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据 [J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 229~237.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Song Biao. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu Terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb dating on zircons of gneissic rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 229~237 (in Chinese with English abstract).
- [75] 郑来林, 廖光宇, 耿全如, 等. 墨脱县幅地质调查新成果及主要进展[J]. *地质通报*, 2004, 23(5-6): 458~462.
- Zheng Lailin, Liao Guangyu, Geng Quanru, et al. New results and major progress in regional geological survey of the Medog County sheet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(5-6): 458~462 (in Chinese with English abstract).
- [76] 潘桂堂, 王立金, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. *地质通报*, 2004, 23(1): 12~19.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Zhu Dicheng. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(1): 12~19 (in Chinese with English abstract).
- [77] Hodges K V, Geissman J W E, Glazner A F E. Tectonics of the Himanaya and southern Tibet from two perspectives. Special focus on the Himalaya [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2000, 112: 324~350.
- [78] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山时间年龄记录[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 1~12.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Liang Fenghua. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- [79] 任纪舜, 肖黎薇. 1:25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱[J]. *地质通报*, 2004, 23(1): 1~11.
- Ren Jishun, Xiao Liwei. Lifting the mysterious veil of the tectonics of the Qinghai-Tibet plateau by 1:250000 geological mapping [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- [80] Molnar P. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications [J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 1988, A326: 33~88.
- [81] Gansser A. *Geology of the Himalayas* [M]. London: Wiley Interscience, 1964. 289.
- [82] Powell C Mc A, Conaghan PJ. Plate tectonics and the Himalayas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 20: 1~12.
- [83] Avouac J-P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20: 895~898.
- [84] Patriat P, Achache J. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanisms of plates [J]. *Nature*, 1984, 311: 615~621.
- [85] Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1990, 97: 382~403.
- [86] Mattauer M. La tectonique sous les plaques [J]. *Science (Edition Francaise de Scientific Américain)*, 2002, 295: 70~75
- [87] Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Tethyan subducted slabs under India [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 171: 7~20.
- [88] 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等. 大陆俯冲作用及青藏高原原缘造山带的崛起[J]. *地学前缘*, 1999, 6(3): 139~151.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 139~151 (in Chinese with English abstract).
- [89] 许志琴, 杨经绥, 戚学祥. 印度/亚洲碰撞——SN 向和 EW 向折离构造与喜马拉雅造山机制的再讨论[J]. *地质通报*, 2006, 25(1-2): 1~14.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Qi Xuexiang. India/Asia collision——A further discussion of N-S- and E-W- directed detachments and Himalaya orogenic mechanism [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- [90] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10: 611~616.
- [91] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(12): 1508~1517.
- [92] Peltzer G, Tapponnier P, Gaudemer Y. Offsets of late Quaternary morphology, rate of slip and recurrence of large earthquakes on the Changma Fault [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988b, 93: 7793~7812.
- [93] Avouac J-P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20: 895~898.
- [94] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. *Sciences*, 2001, 294: 1671~1677.

- [95] 许志琴,李海兵,杨经绥,等.东昆仑山南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用[J].地质学报,2001,75(2):156~164.
Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui, et al. A Large transpression zone at the south margin of the east Kunlun mountains and oblique subduction [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2001, 75 (2): 156~164 (in Chinese with English abstract).
- [96] 李海兵,杨经绥,许志琴,等.阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质年代学证据[J].科学通报,2001,46(16):1333~1338.
Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin. Geological and chronological evidence of Indo-Chinese strike-slip movement in the Altyn Tagn fault zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(16): 1333~1338 (in Chinese with English abstract).
- [97] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China [J]. J. Geophys. Res., 1977, 82: 2905~2930.
- [98] 邓起东,张维歧,张培震,等.海源走滑断裂带及其尾端挤压构造[J].地震地质,1989,11(1):1~14.
Deng Qidong, Zhang Weiqi, Zhang Peizhen, et al. Haiyuan strike-slip fault zone and its compressional structures of the End [J]. Seismology and Geology, 1989, 11 (1) 1~14 (in Chinese with English abstract).
- [99] 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.
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 Geoscientica Sinica, 1999b, 73(3): 193~205 (in Chinese with English abstract).
- [100] Matte Ph, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet between the Tarim and Indus [J]. Earth and Planet. Sci. Lett. 1996, 142: 311~330.
- [101] 李海兵, Valli F, 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.
Li Haibing, Valli F, 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 with English abstract).
- [102] 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 Ruoqiang, Xinjiang and infrastructure study [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1999, 73 (2): 153~161 (in Chinese with English abstract).
- [103] Jiang Mei, Qian Hui, et al. Teleseismic anisotropy and its features in the upper mantle beneath the Tibet plateau and neighboring areas [J]. Metallogenic Implications Global Tectonics and Metallogeny, 2003, 8(1-4): 1~2.
- [104] Wittlinger G, Masson F, Poupinet G, et al. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: Evidence for crustal blocks and mantle velocity contests [J]. Earth Planet Sci, Lett, 1996, 139: 263~279.
- [105] Wittlinger G F, Tapponnier P, Poupinet G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault [J]. Science, 1998. 74~76.
- [106] 许志琴,姜枚,杨经绥,等.青藏高原的地幔结构:地幔羽,地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉 [J]. 地学前缘,2004,11(4):329~343.
Xu Zhiqin, Jiang Mei, Yang Jingsui, et al. Mantle structure of Qinghai-Tibet Plateau: Mantle plume, mantle shear zone and delamination of lithospheric slab [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (4): 329~343 (in Chinese with English abstract).
- [107] Grandt S P, et al. Global seismic tomography: a snapshot of convection in the Earth [J]. Nature, 1997, 386: 578~584.
- [108] Widiyantoro S, Van der Hils R D T. The slab of subducted lithosphere beneath the Sunda arc, Indonesia [J]. Science, 1996, 271: 1566~1570.
- [109] Molnar P. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications [J]. Phil Trans R Soc Lond, 1988, A326: 33~88.
- [110] Beghoul N, Barazangi M, Isacks B L. Lithospheric structure of Tibet and western north America: mechanisms of uplift and a comparative study [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98: 1997~2016.
- [111] Hirn A, Jiang M, Sapin M, et al. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet [J]. Nature 1995, 375: 571~574.
- [112] Zhao W J, Nelson K D and Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet [J]. Nature, 1993, 366: 557~559.
- [113] O'Brien PJ, Zotv N, Law R, et al. Coesite in Himalayan eclogite and implications for models of India-Asia collision [J]. Geology, 2001, 29: 435~438.
- [114] 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,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).

The Qinghai–Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau

XU Zhi–qin, YANG Jing–sui, LI Hai–bing, ZHANG Jian–xin,
ZENG Ling–sen, JIANG Mei

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

Abstract:Recent studies on the compositions and structures of multiple terrains within the Qinghai–Tibet plateau have offered us an opportunity to examine how this plateau was assembled in the context of terrain tectonics. The formation of this plateau resulted from long–term tectonic activities since the late Paleozoic which is represented by (1) convergence and welding of a number of exotic terrains, and (2) collision induced "orogenic plateaux" and has reached its climax in the Cenozoic. Large–scale strike–slip faults (commonly act as terrain boundary faults) has played a central role in controlling the relative offset, magnitude of lateral extrusion, and the geometry of these terrains. The final assembly and rise of the Qinghai–Tibet plateau may result from a combination of contemporaneous processes, e.g. super–deep subduction (>600 km) at its southern margin, intra–continental subduction at its northern margin, in–land deep thermal processes, and NE–trending right–lateral uplift of mantle lithosphere.

Key words:Qinghai–Tibet Plateau; "non–in–situ" terrane assembly; compounding–collisional orogeny; strike–slip structure; multi–component driving force

About the first author:XU Zhi–qin, female, born in 1941, received a doctor degree in France, academician of the Chinese Academy of Sciences, her research interests include tectonics and structural geology; E–mail: xzq@ccsd.org.cn.