

西昆仑岩石圈的拆沉作用及其深部构造含义

——地震层析成像及航磁异常证据

王有学¹ 姜 枚² 熊盛青³ 薛典军³ G Wittlinger⁴ A Paul⁵

(1. 桂林工学院资源与环境工程系, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

4. Institut de Physique du Globe de Strasbourg, CNRS, 67084 Strasbourg, France;

5. Laboratoire de Geophysique Interne et de Tectonophysique, CNRS, 38041 Grenoble, France)

摘要:西昆仑构造带及其邻区的宽频带地震探测和航磁异常研究结果表明,西昆仑构造带的南部(亦即青藏板块)的岩石圈向塔里木盆地下部俯冲,西昆仑的蛇绿岩带是闭合于加里东造山时期的古特提斯洋的残迹;青藏板块在向塔里木盆地俯冲的过程中,受到来自北部坚硬、古老的塔里木地体的强力阻挡,使得向北俯冲的岩石圈产生裂解,发生拆沉;在青藏板块岩石圈发生拆沉作用的同时,南部青藏板块岩石圈的回弹及软流层的浮力作用导致上部地壳发生引张断陷,深部熔岩上涌造成了碱质型熔岩沿断陷裂隙喷溢,同时也形成了构造带两侧反逆冲构造格局;西昆仑中央断裂是青藏高原的“第四缝合带”,北昆仑构造带仅仅是由于在青藏板块岩石圈发生拆沉作用时,西昆仑构造带中地壳浅部物质逆冲于塔里木前陆之上形成的。

关键词:地震层析成像;航磁异常;西昆仑;岩石圈;板块俯冲;拆沉作用

中图分类号:P315.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)02-0299-10

西昆仑构造带位于青藏高原西北部,往西与青藏高原的西部构造结相连,是当前国际地质界关注的热点之一。青藏高原的西部构造结是印度洋向北扩张挤压的应力集聚带,它同喜马拉雅造山带相类似,也是陆-陆碰撞造山带的典型地区之一。作为陆内碰撞造山带的历史记录,这里的变形构造及变质作用具有一定的代表性。另一方面,从构造历史来看,这里又是“特提斯域”与“古亚洲域”接壤及转换地带,与青藏高原的形成演化有着密切的关系。正是西昆仑构造带所处的独特的大地构造位置,吸引着全世界地质学家的极大关注。但是,由于自然环境及交通条件的限制,它的研究程度相对较低。虽然原地质矿产部及中国科学院等单位对该区组织过多次综合考察^[1-7],但整体研究程度不够深入,对该区的地质构造格架、成因及演化等方面的认识,尤其是对其深部构造背景的认识,还存在着许多问题。近年来,随着新一轮西昆仑构造带科学研究的展开,特别是地球物理及地质等多方面资料的密切结合,对西昆仑及其邻区的岩石圈构造演化提出了

新的观点及模式^[8-18]。但是,仍然缺少深部地球物理证据,尤其是来自上地幔岩石圈有关深部构造的地球物理证据的支持。

为了进一步研究西昆仑构造带的深部地质、地球物理结构特征,中国地质科学院与法国科研中心合作,于2001年在新藏公路沿线进行了宽频带天然地震观测,地震剖面自新疆的叶城至西藏阿里地区的首府噶尔,全长约为700 km(图1)。该项目的研究旨在探测青藏高原西缘的深部构造及其与北部毗邻的塔里木地块的接触关系,获得西昆仑造山带地壳上地幔的速度结构图像,解答诸多有争议的地质问题。基于该项目观测到的地震数据的层析成像结果,笔者对西昆仑地区大陆俯冲过程中岩石圈的特征进行了探讨。

1 区域构造背景

西昆仑宽频带地震探测剖面位于中国大陆的西部,自北向南穿越了塔里木盆地的西南缘、西昆仑构造带、甜水海地体、羌塘地体及冈底斯地体等构造单元,各地体被西昆仑北

收稿日期:2005-11-29;改回日期:2006-01-17

基金项目:国土资源部青藏高原专项(20001010201)和法国国家科研中心(CNRS)资助。

作者简介:王有学,男,1961年生,博士,教授,主要从事地球内部物理结构、地球动力学研究及地球物理教学工作;

E-mail:youxue_wang@yahoo.com。

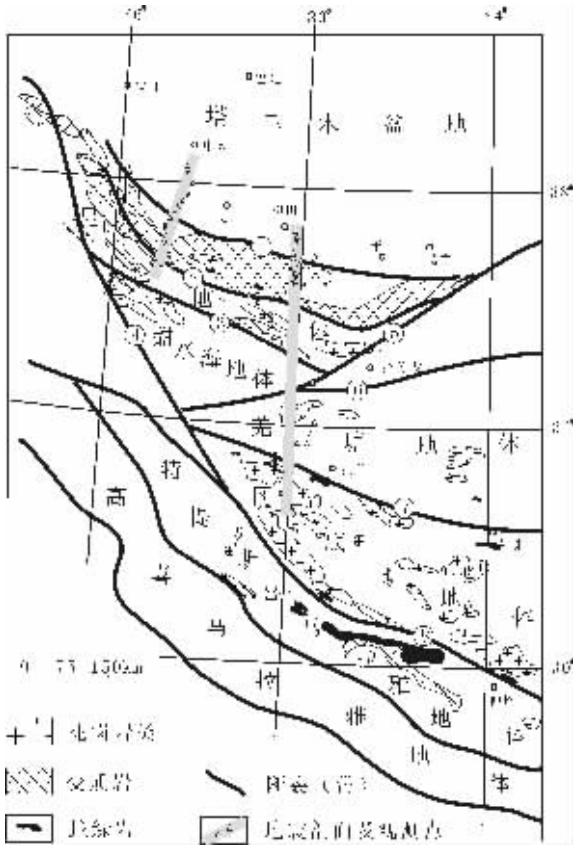


图1 西昆仑地区地质构造简图

- ①—昆仑北缘断裂(NKF);②—昆仑中央断裂(CKF);③—昆仑南缘断裂(SKF);④—喀喇昆仑断裂(KKF);⑤—阿尔金断裂(ATF);
⑥—拉竹龙—金沙江断裂(LJF);⑦—班公—怒江断裂(BNF);
⑧—雅鲁藏布江断裂(YZF)

Fig.1 Tectonic sketch map of the West Kunlun and its adjacent areas

- ①—NKF—North Kunlun Fault;②—CKF—Central Kunlun Fault;
③—SKF—South Kunlun Fault;④—KKF—Karakorum Kunlun Fault;
⑤—ATF—Altyin Tagh Fault;⑥—LJF—Lashulong—Jinshajiang Fault;
⑦—BNF—Bangong—Nujiang Fault;⑧—YZF—Yarlung Zangbo Fault

缘断裂、西昆仑南缘断裂、阿尔金断裂、班公—怒江断裂及雅鲁藏布江缝合带所分割(图1),这些地体和构造带的形成时代有由北向南渐新的趋势。

前寒武纪以来,塔里木盆地经历了一个复杂而漫长的形变历史^[19],其基底由太古代和元古代的变质岩组成^[20-21],沉积盖层(包括元古界及显生宇)在凹陷中心可达17 km,在隆起区则为5 km左右^[22]。古生代地层主要为地台型碳酸盐岩及细粒碎屑岩^[23],盆地中央的中生代地层记录了盆地边缘的收缩与隆起的多期活动历史,这些活动历史很可能与二叠—侏罗纪时期羌塘地块及晚侏罗拉萨地块的增生有关^[24];后来由于北部的天山及南部的西昆仑山向盆地内部的逆冲和超覆作用,使得盆地边缘发生大规模的前陆凹陷^[25,26];在新生代时

期,印度板块与亚洲板块的碰撞使得塔里木盆地发展成为一个复杂的前陆盆地。天山及西昆仑山的逆冲及超覆作用使得前陆盆地进一步凹陷,并于始新世在西昆仑逆冲带北侧形成了以和田为中心的巨厚沉积。

西昆仑造山带是喜马拉雅—西藏造山带的重要组成部分。在西昆仑及喀喇昆仑地区,喜马拉雅—西藏造山带向西北方向逐渐变窄,与甜水海地体共同构成一倒三角型区域。西昆仑地块由西昆仑中央断裂将其一分为二,即北昆仑和南昆仑,而且在西昆仑中央断裂附近分布有蛇绿岩带^[9]。西昆仑地区的加里东期花岗岩带明显受区域构造控制,被严格地限制于南昆仑构造带中,与西昆仑地区代表新元古代—早古生代的蛇绿岩带呈近似平行展布,北西—南东向延伸,构成了明显的岩浆岩双带特征。蛇绿岩是洋壳物质的代表,常位于洋壳或板块的消减带上;而钙碱性系列的岩浆组合则形成于板块俯冲环境下的岛弧或活动陆缘的岩浆弧前缘,通常与蛇绿岩带平行展布,蛇绿岩带靠近大洋一侧,钙碱性岩浆靠近大陆一侧,而且蛇绿岩带的时代老,钙碱性岩浆带的时代新。王元龙等^[27]通过对西昆仑加里东期花岗岩带地质特征的分析研究,认为西昆仑地区的加里东期花岗岩带属钙碱性系列岩石,是大陆边缘的俯冲型岩浆活动带,而且西昆仑地区洋壳的消减是由北向南进行的,西昆仑北缘断裂是青藏高原“第四缝合带”的位置。

国内外学者对西昆仑造山带的隆升和演化提出了多种假设。白文吉等^[28]及 Lyon-Caen^[29]较早认为塔里木地块至少俯冲到西昆仑之下,并得到深部地球物理研究成果的支持^[11,30]。还有一些地质学家认为新生代以来存在昆仑山向塔里木盆地的仰冲活动^[31]。根据塔里木盆地与西昆仑结合地带的深部地震反射研究及地表地质调查,肖序常等^[9]认为塔里木并非直接插入青藏高原,而是在青藏高原西北缘形成一种对冲,并推测在西昆仑与塔里木的结合部位的深部存在岩石圈的拆离作用。Tapponnier et al^[10]认为青藏高原的隆升是由于印度板块与亚洲板块的碰撞作用,使得印度大陆在喜马拉雅缝合带下部向北俯冲,而在喜马拉雅缝合带北部的亚洲大陆则一块一块地向南发生俯冲,使得地壳缩短并加厚。但是,不论哪种假说或推测,都缺少深部地球物理证据的支持,尤其是来自上地幔岩石圈的证据。

2 西昆仑构造带及其邻区的速度结构成像

在西昆仑构造带及其邻区宽频带地震探测的野外地震数据的采集过程中,使用了法国的 MiniTitan 三分量地震仪器,检波器的周期分别为1 s、5 s、60 s、100 s。在采集到的地震数据中,体波震相清晰。在层析成像的过程中,采用了不等间距的网格结构。在垂向上分为10层,浅部(<200 km)的垂向分辨率为10~15 km,水平分辨率为10~15 km;深部(<400 km)的水平分辨率为45 km,垂向分辨率为100 km。利用 ACH 层析成像技术^[32,33],对所观测到大于4.5级的271次远震事件的纵波资料进行了反演计算,参加反演的地震射线为4549条,

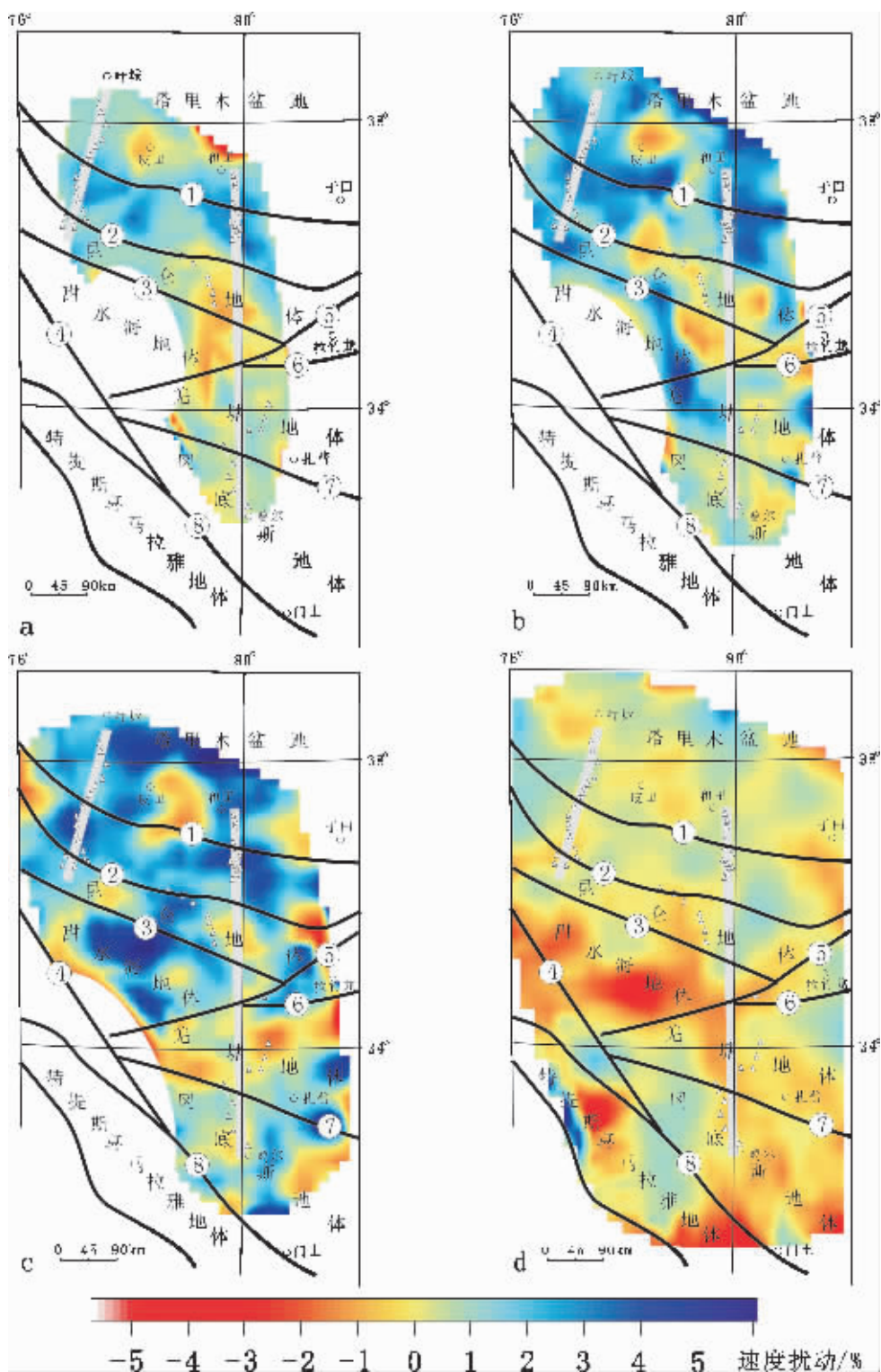


图 2 西昆仑及其邻区的地震层析成像结果

地震层析不同深度的水平切片:a—10 km 深度;b—40 km 深度;c—90 km 深度;d—210 km 深度

- ①—昆仑北缘断裂(NKF);②—昆仑中央断裂(CKF);③—昆仑南缘断裂(SKF);④—喀喇昆仑断裂(KKF);
- ⑤—阿尔金山断裂(ATF);⑥—拉竹龙—金沙江断裂(LJF);⑦—班公—怒江断裂(BNF);⑧—雅鲁藏布江断裂(YZF)

Fig.2 Seismic tomographic imaging of the West Kunlun and its adjacent areas

Horizontal slices at different seismic tomographic levels: a—10 km depth; b—40 km depth; c—90 km depth; d—210 km depth
Abbreviations same as in Fig. 1

其结果如图 2 所示。

图 2 给出了研究区域内不同深度的地震层析成像结果。由速度扰动图像可以看出,10 km 深度的速度结构分布特征(图 2-a)反映了地壳浅部的速度结构特征,塔里木盆地在这一深度表现为低速扰动,与塔里木前陆盆地的巨厚沉积相对应;在西昆仑北缘断裂(NKF)与中央断裂(CKF)之间,其速度分布与南北两侧的情形形成鲜明的对比,呈现为一条与构造相平行的高速扰动带;在西昆仑中央断裂(CKF)以南与阿尔金断裂(ATF)以北地区又以低速扰动为主,而在西昆仑地体的南部与甜水海地体之间没有明显的差别;但是,在阿尔金断裂(ATF)与拉竹龙—金沙江断裂(LJF)以南的羌塘地体和冈底斯地体,速度明显增高。在 40 km 深度,速度扰动图像(图 2-b)反映了中、下地壳的速度结构特征。与上一层相比,在西昆仑中央断裂以南地区继续保持与上地壳相似的特征,但西昆仑的北部已与塔里木盆地融为一体,并以高速扰动为特征,这可能说明西昆仑北部的下地壳甚至包括中地壳都是塔里木盆地向西南的延伸。

根据西昆仑北侧的广角反射折射地震探测^[4]及深反射地震研究^[11],塔里木地体南缘的地壳厚度为 57~60 km,并且有向南逐渐加大的趋势。然而,青藏高原地壳普遍增厚,一般均大于 60 km,最大厚度达 80 km^[35-40]。因而,图 2-c 反映了西昆仑构造带及其邻近地区的上地幔顶部的速度结构。西昆仑中央断裂以北地区,总体上还是以高速扰动为主,与塔里木盆地的岩石圈地幔相对应。而在西昆仑南部及甜水海地区的中心部位出现高速扰动块体,并为一些不连续的低速扰动体所包围,推测该高速体可能是西昆仑下部岩石圈上地幔物质沿一定的深部构造通道侵入其地壳底部所形成的。羌塘地体及冈底斯地体的速度较低,反映了青藏高原年轻的壳幔过渡带的物理特征。除了塔里木地体的南缘继续保持高速特征外,最显著的特征是在西昆仑地体内部出现了与地表构造走向相一致的低速扰动体异常的定向排列(NW),并且以阿尔金断裂为界,使其与南侧以相对小的低速扰动为特征的羌塘地体区分开来。当深度增加到 210 km 时(图 2-d),已深入到上地幔,速度扰动图像的特征发生了根本的变化,测区的广大范围被低速扰动所覆盖。但是,在西昆仑地体北部的该深度上存在一个与构造走向相一致的高速扰动带,这种现象似乎指示了青藏高原岩石圈与塔里木岩石圈深部分界的位置,同时还证实了塔里木地体的岩石圈厚度大于青藏高原岩石圈厚度^[4]。另外,由甜水海地体向西昆仑地体南部的速度逐渐增大的现象表明,西昆仑中央断裂南侧的岩石圈存在向北加深的趋势,这一事实在层析成像结果的垂直断面上得到充分的体现。

根据地震台站的位置,沿叶城—麻扎(叶城剖面)及和田—噶尔(和田剖面)两条测线得到两个相应的纵向断面上的速度扰动图像(图 3)。地壳浅部,西昆仑地体北部的下方存在一平缓向南倾的低速扰动带,它很可能与浅部构造密切相关;而在西昆仑中央断裂以南地区则表现为高速扰动的明显

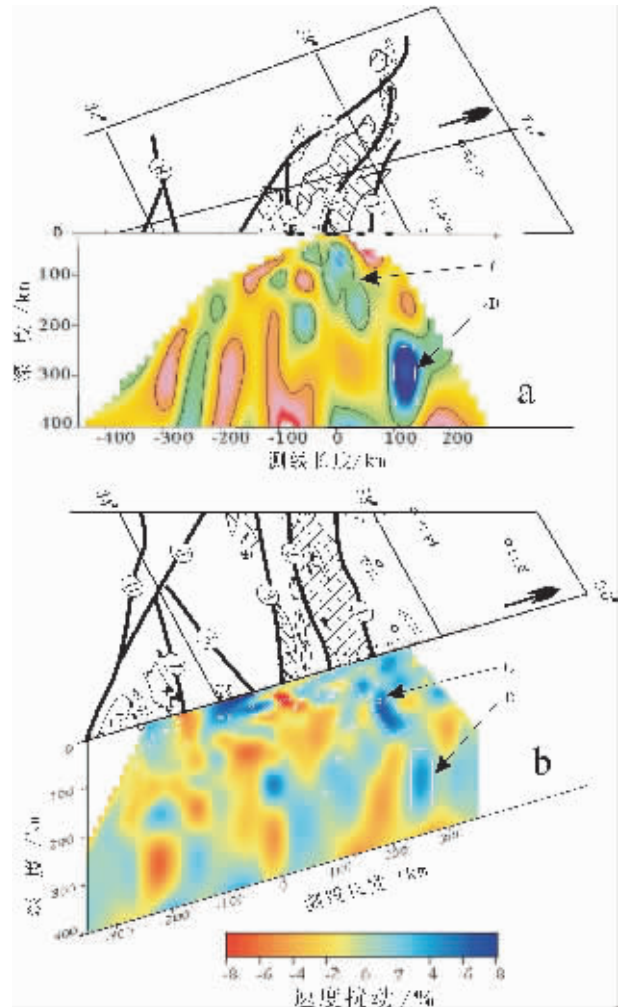


图 3 穿越西昆仑构造带的地震层析断面图
a—叶城剖面;b—和田剖面,小白圈为 1966—2001 年期间发生的大于 4 级的地震震源分布; C—青藏板块岩石圈板片;
D—青藏板块岩石圈板片的拆沉块体
①—昆仑北缘断裂(NKF);②—昆仑中央断裂(CKF);
③—昆仑南缘断裂(SKF);④—喀喇昆仑断裂(KKF);
⑤—阿尔金断裂(ATF);⑥—拉竹龙—金沙江断裂(LJF);
⑦—班公—怒江断裂(BNF);
⑧—雅鲁藏布江断裂(YZF)

Fig.3 Seismic tomographic cross sections across the West Kunlun tectonic belt

a—Yecheng section;b—Hotan section. White circle shows the hypocentral distribution of earthquakes of magnitudes greater than 4 during 1966—2001. C is the Qinghai—Tibet lithospheric slab and D a delaminated block of the slab. Abbreviations same as in Fig. 1

北倾特征(图 3-b)。这些现象与地表断层在西昆仑中央断裂以北地区向南倾、以南地区向北倾的情形相吻合。

在和田剖面上的西昆仑北部(图 3-b),其下方有一个倾向北方的高速扰动带,向下可延伸到 200 km 左右,经过一个

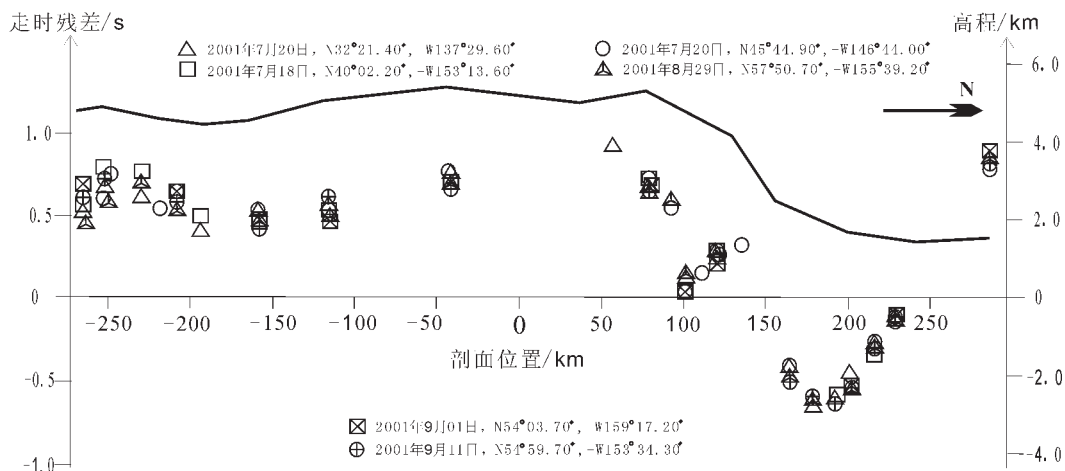


图 4 和田剖面的地形及 2001 年发生在千岛及本洲岛的 6 次地震的 P 波走时残差分布

Fig.4 Topography of the Hotan profile and observed P-wave traveltime residuals of six earthquakes that happened in Kuril and Honshu in 2001

低速扰动后,再往下又出现一个略向北倾的高速扰动体。无独有偶,类似的现象也出现在位于西北部的叶城剖面上(图 3-a)。在西昆仑中央断裂以北地区的下方,一个向北倾斜的高速扰动带在大约于 220 km 的深度上被低速扰动所切断,并且向下可延伸到 380 km。2001 年发生在千岛及本洲岛的 6 次地震的残差分布(图 4)表明,在西昆仑中央断裂附近的地震波走时残差发生了明显的变化,并且表现为由南向北走时急剧减小,进一步指示西昆仑中央断裂北侧下部高速扰动体的存在。因而,可以推断,在西昆仑中央断裂北侧深部的高速扰动带代表了位于西昆仑中央断裂南侧的青藏高原的岩石圈上地幔板片,它曾向位于西昆仑中央断裂北侧的塔里木盆地的岩石圈下部俯冲,并且在塔里木地块的强力抵抗作用下发生拆离,位于更深部位且略向北倾的高速扰动体正是发生拆离后的青藏高原岩石圈上地幔板片。

根据 1966—2001 年期间区域的地震活动性^[3],将大于 4 级的地震投影在和田剖面上(图 3-b),可以看出地震震源呈现明显的带状分布,而且该带向北逐渐加深,最大深度可以达到 200~265 km。这一事实进一步表明青藏高原岩石圈向塔里木岩石圈下部俯冲的可能性,同时,频繁的地震活动也暗示着这一俯冲活动仍在进行。

3 西昆仑构造带及其邻区的航磁异常特征

众所周知,随着岩石基性程度的增高,岩石的磁化率随之增大。通常,沉积岩磁性较弱,一般不会引起磁异常;部分变质岩具有磁性,可以引起磁异常;侵入岩类磁性较强,是引起磁异常的主要因素,但部分中酸性花岗岩由于磁性弱而无异常反映;基性、超基性岩具有最强的磁性,并往往呈带状分布,使得其磁异常呈现为宽带状强异常;火山岩由于磁性变

化较大且分布不均匀,使得磁异常杂乱无章。同时,物质的磁性受温度的影响,在一定的温度下,会失去其磁性特征,因而在地壳深部及上地幔,尤其是居里面以下,物质将不再显示任何磁性特征。

1998—2000 年期间,中国国土资源航空物探遥感中心实施的“青藏高原中西部航磁调查”项目,首次全面地展示了青藏高原中西部的磁场面貌和特征^[2],同时也为研究西昆仑造山带的构造特征提供了可贵的资料(图 5)。

在西昆仑南缘断裂以北地区,包括西昆仑地体和塔里木前陆盆地,显示为明显的正磁异常(图 5),但是,其产生异常的物质场源却大相径庭。塔里木前陆盆地分布有巨厚的沉积盖层,而沉积岩不具有磁性或磁性很弱,因而推测该航磁异常可能是塔里木盆地太古代和元古代的磁性基底的反映。在经过上延处理之后(图 6),航磁异常连续性变得更好,因而可以确定,塔里木前陆盆地的航磁异常是由塔里木盆地太古代和元古代的磁性基底产生的。

西昆仑地块的北部为带状变质岩带所覆盖,最老的岩石为元古代的角闪岩相变质岩——喀拉喀什群,它可能是产生该异常的场源之一^[2]。另一方面,早元古代—晚古生代的蛇绿岩带呈线状分布于西昆仑中央断裂北侧,可能是古洋壳消减的残余物质,也是西昆仑地块北部航磁异常的另一个场源。上延结果表明(图 6),随着上延高度的增加,该带中的航磁异常逐渐与北侧塔里木前陆盆地的航磁异常连为一体,推测在西昆仑地块北部的深处,至少中地壳及其以下部分(图 6-c),其磁性基底具有与塔里木盆地磁性基底相似的性质,即塔里木盆地磁性基底已深入到西昆仑地体北部的下方,而且可能受到该带下部南倾低速扰动带的控制(图 3)。这可以解释为青藏高原在向塔里木盆地下部俯冲的过程中,地壳浅部物质

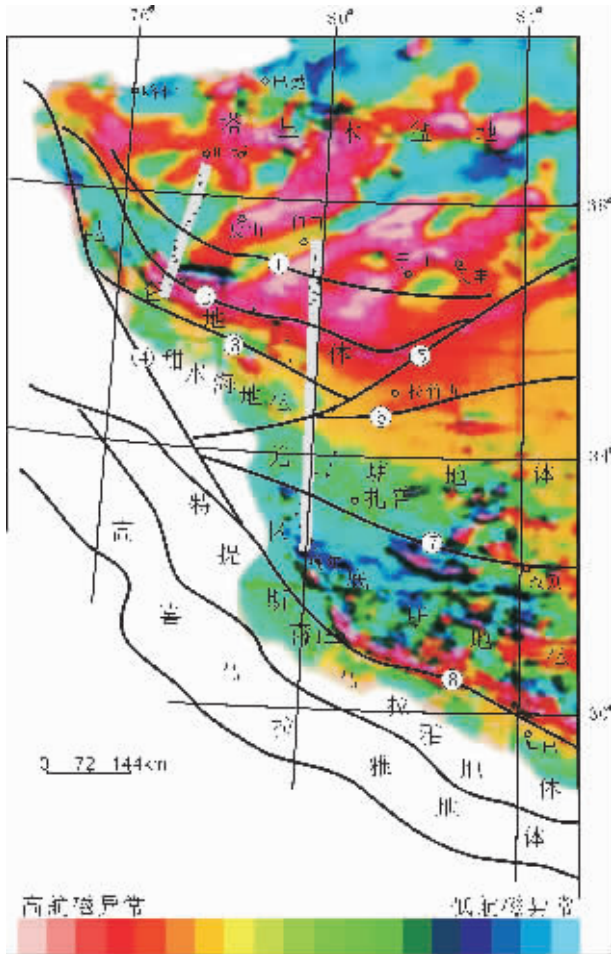


图5 西昆仑及其邻区的航磁 ΔT 异常图

- ①—昆仑北缘断裂(NKF);②—昆仑中央断裂(CKF);③—昆仑南缘断裂(SKF);④—喀喇昆仑断裂(KKF);⑤—阿尔金断裂(ATF);
⑥—拉竹龙—金沙江断裂(LJF);⑦—班公—怒江断裂(BNF);
⑧—雅鲁藏布江断裂(YZF)

Fig.5 Aeromagnetic anomaly (ΔT) in the West Kunlun and its adjacent areas

Abbreviations same as in Fig. 1

向塔里木前陆发生逆冲作用。

西昆仑加里东期花岗岩带呈 NWW 向带状分布,并且被严格地限制于西昆仑的南部构造带中,构成了明显的岩浆岩双带特征。南昆仑构造带中的航磁异常由北向南逐渐变弱,这种变化规律可进一步延续到甜水海地体的中部。然而,当上延 5 km 后(图 6-a),南昆仑构造带及甜水海地体的航磁异常完全消失。因此,西昆仑南部构造带及甜水海地体的航磁异常是由加里东期花岗岩引起的,而且可以推测该花岗岩的分布由南往北逐渐增厚,这与西昆仑南缘断裂附近地壳浅部向北逐渐增厚的低速扰动(图 3-b)相吻合,该低速扰动体的底部很可能与存在于西昆仑南部构造带中向北倾的逆冲断

裂有着密切的关系。西昆仑中央断裂及阿尔金断裂以南地区以弱航磁异常为特征(图 5)。但是,上延到 20 km 时,又出现了较强的磁异常(图 6-c),而且磁性随着上延高度的继续增加而逐渐变弱(图 6-d)。该磁性异常部位与西昆仑南缘断裂下方地壳中部的低速扰动体相对应(图 3-b),据此推测在地壳中部可能存在局部的侵入岩体,而且由于岩体的温度随着深度的增加而升高,岩体的磁性也随之减弱。

4 西昆仑构造带的演化模式

西昆仑构造带呈带状分布于西昆仑中央断裂北侧的蛇绿岩中,是目前青藏高原西北边缘保存较齐全、时限有依据的蛇绿岩带,它反映了自元古代岩石圈开始引张、裂解到早古生代洋盆逐渐聚合、消减的过程^[9]。据地球化学研究^[7,16,42],西昆仑蛇绿岩形成于加里东造山时期的早石炭世,其中的喷出岩属于拉斑玄武岩系列,代表了一种扩张脊的洋底玄武岩。石炭纪开始西昆仑与塔里木盆地逐渐拉开,形成大洋(古特提斯洋),接受海相沉积;晚二叠世末—早二叠世,西昆仑与塔里木之间的大洋重新闭合,西昆仑褶皱成山,形成西昆仑构造带。毫无疑问,西昆仑构造带是青藏高原的北部界限,许多学者称之为青藏高原的“第四缝合带”^[27]。

近年来,西昆仑构造带的演化成为全球地质学家关注的焦点之一,并且引起了激烈的争论。有的学者^[10]认为,在青藏高原这一印度板块与亚洲板块碰撞所形成的构造带中,喜马拉雅缝合带以北地区,包括西昆仑构造带,除了印度板块沿雅江缝合带向北俯冲以外,所有的缝合带均是由于陆内板块向南俯冲拼贴而成,并且塔里木盆地的岩石圈在青藏高原的北部边界俯冲于青藏高原之下,使得青藏高原的岩石圈构造形如“浴盆(Bathtub-like)”;又有的学者^[8,11]则认为,在塔里木与西昆仑的交接部位存在“双边俯冲”机制,由于受南北向的水平挤压作用,形成面对面的俯冲作用,并不存在长距离的相互俯冲下插,而且由于新生代晚期挤压应力的积累增大,岩石圈下部物质被压实密度增大,继而在岩石圈底部发生拆沉。然而,无论是那一种模式,其致命的缺陷都是缺少岩石圈深部构造证据的支持。在前者的模式中,青藏高原北部的深部构造模式同现有的地球物理结果相矛盾,在金沙江缝合带附近地区的地震探测中已经证实^[9],金沙江断裂在玉树一带以较大的角度向北倾斜,这意味着如果这里曾经发生过俯冲作用,那么俯冲的方向也应该是由南往北,而非由北往南。而后者只是根据西昆仑北部边缘的深地震反射资料对整个西昆仑构造带的深部构造进行推断,实际上它只能反映塔里木前陆盆地南缘地壳内部的深部构造,况且其推测的岩石圈拆沉作用并无上地幔岩石圈的地球物理证据。

西昆仑构造带及其邻区的宽频带地震探测和航磁异常研究结果为揭开西昆仑构造带的深部构造特征提供了有力的深部地球物理证据。根据研究结果,建立了西昆仑构造带的深部结构模式(图 7)。

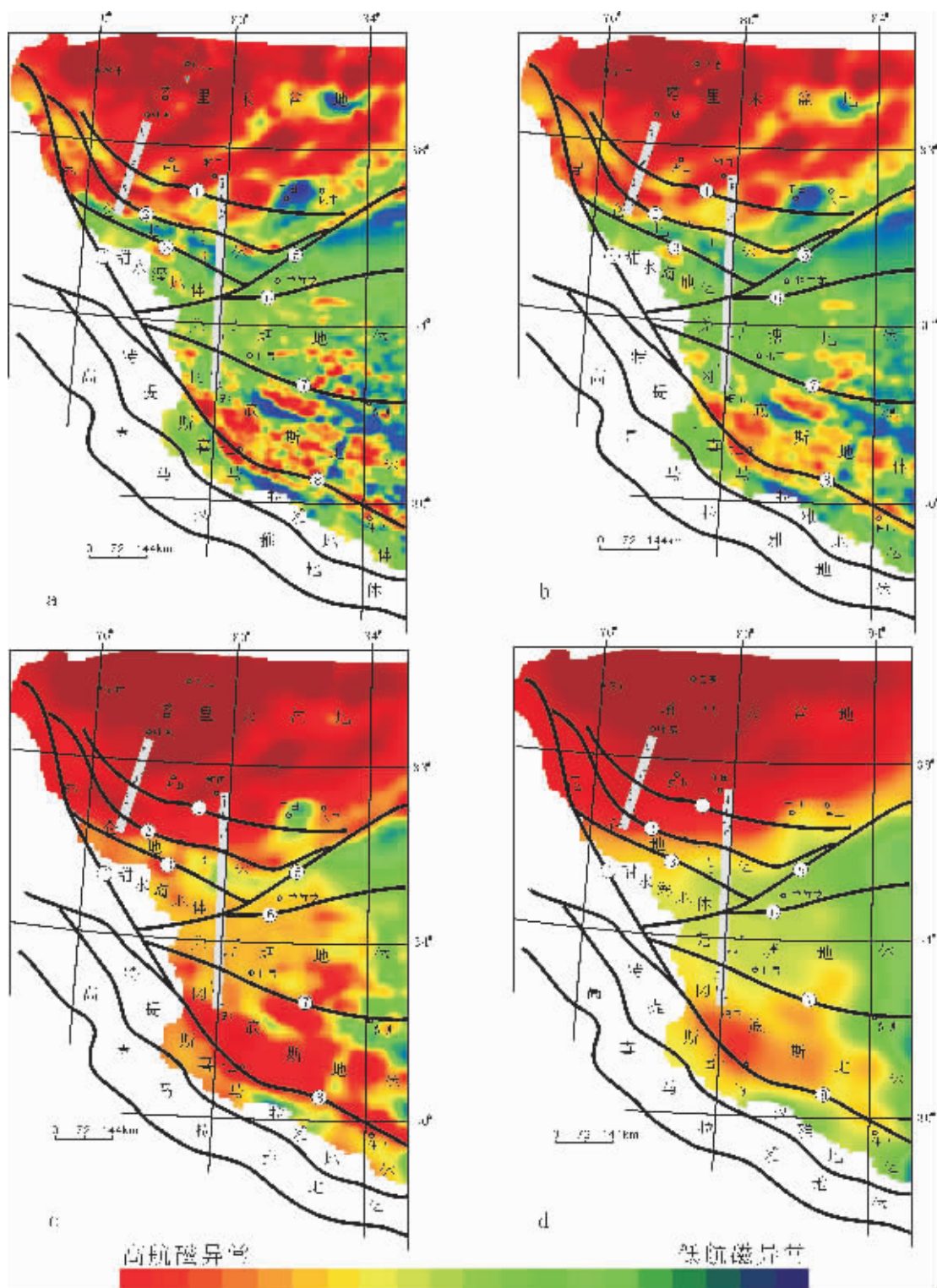


图 6 西昆仑及其邻区的航磁异常延拓图

a—上延 5 km; b—上延 10 km; c—上延 20 km; d—上延 50 km

- ①—昆仑北缘断裂(NKF); ②—昆仑中央断裂(CKF); ③—昆仑南缘断裂(SKF); ④—喀喇昆仑断裂(KKF); ⑤—阿尔金断裂(ATF);
- ⑥—拉竹龙—金沙江断裂(LJF); ⑦—班公—怒江断裂(BNF); ⑧—雅鲁藏布江断裂(YZF)

Fig.6 Upward continuation of aeromagnetic anomalies in the West Kunlun and its adjacent areas
a—Upward continuation 5 km; b—Upward continuation 10 km; c—Upward continuation 20 km;
d—Upward continuation 50 km. Abbreviations same as in Fig. 1

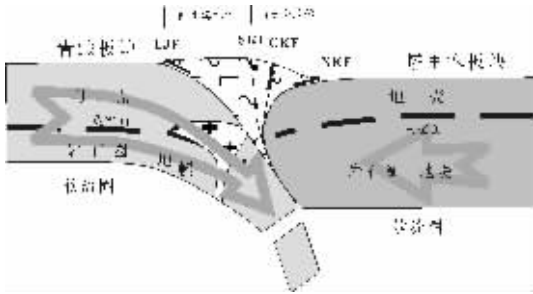


图7 西昆仑构造带的结构模式

LJF—拉竹龙—金沙江断裂;SKF—昆仑南缘断裂;CKF—昆仑中央断裂;NKf—昆仑北缘断裂

Fig.7 Lithospheric structure model of the West Kunlun tectonic belt

LJF—Lazhulong—Jinshajiang Fault;NKf—North Kunlun Fault;
CKF—Central Kunlun Fault;SKF—South Kunlun Fault

5 结 论

(1) 西昆仑构造带下部向北倾的高速扰动带很可能是向塔里木盆地下部俯冲的青藏板块岩石圈的显示,出露于西昆仑中央断裂北侧的蛇绿岩套就是闭合于加里东造山时期的古特提斯洋的残迹。

(2) 青藏板块在向北部的塔里木盆地俯冲的过程中,受到来自北部坚硬、古老的塔里木地体的强力阻挡,使得向北部俯冲的青藏高原岩石圈产生裂解,发生拆沉作用,青藏板块岩石圈的前缘部分沉入地幔。

(3) 在青藏板块岩石圈发生拆沉作用的同时,青藏板块岩石圈的回弹及软流层的浮力作用导致上部地壳发生引张断陷,深部熔岩上涌造成了碱质型熔岩沿断陷裂隙喷溢,同时也形成了构造带两侧反逆冲构造格局。

(4) 西昆仑中央断裂才是青藏高原的“第四缝合带”,正是它将青藏高原同塔里木地块分割开来,西昆仑北部构造带仅仅是由于在青藏板块岩石圈发生拆沉作用时,西昆仑构造带中的地壳浅部物质逆冲于塔里木前陆之上所形成的,并且促使了塔里木前陆盆地的发育。

致谢:在本文的研究过程中,中国地质科学院地质研究所肖序常院士、许志琴院士以及中国国土资源物探与遥感中心的姚正煦教授曾给予热情的指导与建议,笔者在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

[1] 邓万明.喀喇昆仑—西昆仑地区基性、超基性岩初步考察[J].自然资源学报,1989,(3):204~211.

Deng Wanming.A preliminary study on the basic-ultrabasic rocks of the Karakorum-western Kunlun Mts [J].Journal of Natural Re-

sources, 1989,(3):204~211(in Chinese).

[2] 邓万明.喀喇昆仑—西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义[J].岩石学报,1995,11(增刊):98~111.

Deng Wanming.Geological features of ophiolite and tectonic significance in the Karakorum-West Kunlun Mts[J].Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(supp.):98~111 (in Chinese with English abstract).

[3] 方锡廉,汪玉珍.西昆仑山加里东期花岗岩类浅识[J].新疆地质,1990,8(2):153~158.

Fang Xilian,Wang Yuzhen.Preliminary discussion on Caledonian granites in western Kunlun Mountains[J].Xinjiang Geology, 1990,8(2):153~158 (in Chinese with English abstract).

[4] 潘裕生.西昆仑山构造特征与演化[J].地质科学,1990,(3):224~232.

Pan Yusheng.Tectonic features and evolution of the western Kunlun Mountain region [J].Scientia Geologica Sinica, 1990,(3):224~232 (in Chinese with English abstract).

[5] 潘裕生,王毅,Ph. Matte,等.青藏高原叶城—狮泉和路线地质特征及区域构造演化[J].地质学报,1994,68(4):295~306.

Pan Yusheng, Wang Yi, Matte Ph, et al. Tectonic evolution along the geotraverse from Yecheng to Shiquanhe[J].Acta Geologica Sinica, 1994,68(4):295~306 (in Chinese with English abstract).

[6] 许荣华,张玉泉,谢应雯,等.西昆仑山北部早古生代构造—岩浆带的发现[J].地质科学,1994,29(4):313~328.

Xu Ronghua, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, et al.A discovery of an early Paleozoic tectono-magmatic belt in the northern part of west Kunlun Mountains[J].Scientia Geologica Sinica, 1994,29(4):313~328 (in Chinese with English abstract).

[7] 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).

[8] 肖序常,刘训,高锐,等.西昆仑及邻区岩石圈结构演化[J].地质通报,2002,21(2):63~68.

Xiao Xuchang, Liu Xun, Gao Rui, et al.Lithospheric structure and tectonic evolution of the west Kunlun and its adjacent areas—Brief report on the south Tarim-west Kunlun multidisciplinary geoscience transect[J].Geological Bulletin of China, 2002,21(2):63~68 (in Chinese with English abstract).

[9] 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).

[10] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Françoise Roger, et al.Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J].Science, 2001, 294(23):1671~1677.

[11] Gao R, Huang H, Lu D, et al.Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim Basin and the West Kunlun Mountains[J].Chinese Science Bulletin, 2000,45(24):2281~2286.

- [12] Matte P, Tapponnier P, Amuad N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 142: 311~330.
- [13] Rnaud N O, Vidal Ph, Tapponnier P, et al. The high K₂O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications [J]. *Earth Planet. Sci. Lett*, 1992, 111: 351~367.
- [14] 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起 [J]. *地质学前沿*, 1999, 6(3): 139~151.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at margin of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 139~151 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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(4): 329~334.
Xue Guangqi, Jiang Mei, Su Heping, et al. Tomographic study on the tectonics in the depth of Yecheng - Shiquanhe of Tibetan Plateau [J]. *Sciences in China (series D)*, 2004, 34(4): 329~334 (in Chinese with English abstract).
- [16] 郭坤一, 张传林, 赵宇, 等. 西昆仑造山带东段中新元古代洋内弧火山岩地球化学特征 [J]. *中国地质*, 2002, 29(2): 161~166.
Guo Kunyi, Zhang Chuanlin, Zhao Yu, et al. Geochemistry of Meso- and Neoproterozoic intra-oceanic arc volcanic rocks in the eastern segment of the western Kunlun orogenic belt [J]. *Geology in China*, 2002, 29(2): 161~166 (in Chinese with English abstract).
- [17] 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 dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau and Altun fault [J]. *Geology in China*, 2002, 29(4): 346~350 (in Chinese with English abstract).
- [18] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳 [J]. *中国地质*, 2004, 31(3): 346~350.
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): 346~350 (in Chinese with English abstract).
- [19] Wang Q, T Nishidai, M P Coward. The Tarim Basin. NW China: Formation and aspects of petroleum geology [J]. *J. Pet. Geol.*, 1992, 15, 5~34.
- [20] Tian Z Y, Chai G L, Kang Y Z. Tectonic Evolution of the Tarim Basin [J]. *Elsevier Sci.*, New York, 1989: 33~43.
- [21] Chai G, Wang X, Jin X. Petroleum geology and oil potential of Tarim Basin, west China [J]. In: *Exploration and Production*, vol. 2, John Wiley, New York, 1992: 15~23.
- [22] Li D, Liang D, Jia C, et al. Hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, China [J]. *AAPG Bull.*, 1996, 80: 1587~1603.
- [23] Carroll A R, Graham S A, Hendrix M A, et al. Late Paleozoic tectonics amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar basin [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1995, 107: 571~594.
- [24] Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, et al. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, Northwest China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1992, 104: 53~79.
- [25] Jia C. Structural Geology and Petroleum Potential in the Tarim Basin, China [M]. *Pet. Ind. Press House*, Beijing, 1997. 438.
- [26] Metivier F, Gaudermer Y. Mass transfer between eastern Tien Shan and adjacent basins (central Asia): Constraints on regional tectonics and topography [J]. *J. Geophys. Int.*, 1997, 128: 1~17.
- [27] 王元龙, 王中刚, 李向东, 等. 西昆仑加里东期花岗岩带的地质特征 [J]. *矿物学报*, 1995, 15(4): 457~461.
Wang Yuanlong, Wang Zhonggang, Li Xiangdong, et al. Geological features of the Caledonian granite zone in the west Kunlun area [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1995, 15(4): 457~461 (in Chinese with English abstract).
- [28] 白文吉, 杨经绥. 青藏高原隆升的主因——大陆板块内的盆-山碰撞作用 [J]. *长春地质学院学报*, 1987, 17(2): 131~142.
Bai Wenji, Yang Jingsui. The continental intraplate basin and range collision—the major driving agent responsible for the uplifting of Tibetan plateau [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1987, 17(2): 131~142 (in Chinese with English abstract).
- [29] Lyon-Caen H, Molnar P. Gravity anomalies and the structure of western Tibet and the Southern Tarim Basin [J]. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 1251~1254.
- [30] Kao Honn, Rui Gao, Ruey-Juin Rau, et al. Seismic image of the Tarim basin and its collision with Tibet [J]. *Geology*, 2001, 29(7): 575~578.
- [31] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升 [J]. *地质学前沿*, 1999, 6(3): 153~163.
Pan Yusheng. Formation and uplifting of the Qinghai - Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers (Beijing)*, 1999, 6(3): 153~163 (in Chinese with English abstract).
- [32] Aki K, Christofferson A, Husebye E S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere [J]. *J. Geophys. Res*, 1977, 82(2): 277~296.
- [33] Wittlinger G, Paul T, Georges P, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh Fault [J]. *Science*, 1998, 282, 74~76.
- [34] 李秋生, 卢德源, 高锐, 等. 横跨西昆仑—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, Lu Deyuan, Gao Rui, et al. A explosive seismic sounding profile across the transition zone between west Kunlun Mountain and Tarim basin [J]. *Science in China*, 2000, 30(supp.): 16~21 (in Chinese).
- [35] 刘宏兵, 滕吉文. 西藏高原北绿色林错—雅安多地带二维速度结构及断裂分布特征 [J]. *中国地质科学院院报*, 1990, 21, 260~267.
Liu Hongbing, Teng Jiwen. 2D velocity structure and the characteristics of faults distribution along Selin Cuo to Ya'anduo in northern Tibetan plateau [J]. *Bull. of Chinese Geological Science Academy*, 1990, 21: 260~267 (in Chinese with English abstract).

- [36] 卢德源,王香泾.青藏高原北部沱沱河—格尔木地区的地壳结构和深部作用过程[J].中国地质科学院院报,1990,21.
Lu Deyuan, Wang Xiangjing. The crustal structure and deep process along Tuotuo river to Golmud in northern Tibetan Plateau[J]. Bull. of Chinese Geological Science Academy, 1990, 21 (in Chinese with English abstract).
- [37] 滕吉文,熊绍柏.喜马拉雅山北部地区的地壳结构模型和速度分布特征[J].地球物理学报,1983,26(6):525~540.
Teng Jiwen, Xiong Shaobai. Structure of crust and upper mantle pattern and velocity distributional characteristics at northern region of the Himalaya Mountains [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1983, 26(6):525~540 (in Chinese).
- [38] 王有学,钱辉.青海东部地壳速度结构特征研究[J].地学前缘,2000,7(4):568~579.
Wang Youxue, Qian Hui. Study of crustal velocity structure in the eastern Qinghai[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4):568~579 (in Chinese with English abstract).
- [39] 王有学,韩国华.青藏高原东缘二维地壳速度结构及其区域地质构造[A].见:袁学诚主编.阿尔泰—台湾地学断面论文集[C].武汉:中国地质大学出版社,1997.56~70.
Wang Youxue, Han Guohua. Two-dimensional crustal velocity structure and regional geological tectonics on the eastern margin of Qinghai-Xizang plateau[A]. In: Yuan Xuecheng (ed.). Memoirs of the Geoscience Transection for the Continental Lithosphere Beneath Altay—Taiwan, China [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997, 56~70 (in Chinese).
- [40] 熊绍柏,刘宏兵,于桂生.青藏高原岩石圈结构与构造的人工地震探测研究[A]. In: 潘裕生,孔祥儒主编.青藏高原岩石圈结构演化和动力学[C].广州:广东科技出版社,1998.1~19.
Xiong Shaobai, Liu Hongbin, Yu Guisheng. Explosion seismological research of lithospheric structure of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [A]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1998. 1~19 (in Chinese).
- [41] Yuan Xuecheng. Atlas of Geophysical in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 186~188.
- [42] 熊盛青,周洪伏,姚正熙,等.青藏高原中西部航磁调查[M].北京:地质出版社,2001.
Xiong Shengqing, Zhou Hongfu, Yao Zhengxi, et al. Aeromagnetic Survey in Central and Western Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001 (in Chinese).

Delamination of the lithosphere below the West Kunlun and its tectonic implications—evidence from seismic tomographic images and aeromagnetic anomalies

WANG You-xue¹, JIANG Mei², XIONG Sheng-qing³,
XUE Dian-jun³, G Wittlinger⁴, A Paul⁵

- (1. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
3. Airborne Geophysical and Remote Sensing Center of Land and Resources, Beijing 100083, China;
4. Institut de Physique du Globe de Strasbourg, CNRS, 67084 Strasbourg, France;
5. Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique, CNRS, 38041 Grenoble, France)

Abstract: The broadband seismic survey and aeromagnetic anomaly study show that the lithosphere below the southern part (i.e. Qinghai-Tibet plate) of the West Kunlun tectonic belt was subducted beneath the Tarim basin and that the ophiolite belt of the West Kunlun is the relics of the Paleo-Tethys ocean that closed during the Caledonian orogen. Due to the strong resistance from the rigid old Tarim terrane during the subduction of the Qinghai-Tibet plate, the north-subducting lithosphere broke up and delaminated. Meanwhile, the rebound of the Qinghai-Tibet lithosphere and buoyancy of the asthenosphere caused extensional downfaulting of the upper crust, which allowed the molten magma at depth to upwell, thus resulting in eruption of alkaline magma along the faults. Furthermore, this also formed an antithetic thrust tectonic framework on both sides of the tectonic belt. The West Kunlun Central fault is actually the “fourth suture” of the Qinghai-Tibet Plateau, whereas the North Kunlun tectonic belt just formed by thrusting of the material at the shallow crustal level in the West tectonic belt over the Tarim foreland during delamination of the lithosphere of the Qinghai-Tibet plate.

Key words: seismic tomographic image; aeromagnetic anomaly; West Kunlun; lithosphere; subduction; delamination

About the first author: WANG You-xue, male, born in 1961, doctor and professor, mainly engages in the study of the physical structure and geodynamics in the Earth's interior and teaching of geophysics; E-mail: youxue_wang@yahoo.com.