

大陆边缘反 S 状造山带三维模式 兼论青藏高原结构与隆升

李东旭

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 文中根据北美大陆西南边缘造山带的构造地貌及新构造运动特征, 建立了反 S 状大陆边缘造山带的三维构造力学模式, 指出阿拉斯加地区为弧形右旋剪切隆升造山带; 科迪勒拉造山带为直线右旋走滑造山带; 马德雷山以南, 延至加勒比海为一左旋沉降‘旋扭沟-弧-盆系统’。以此模式检验欧亚大陆南缘造山带, 确定从阿尔卑斯经扎格罗斯、喜马拉雅至印度尼西亚蜿蜒曲折的山链是由四个反 S 状造山带连锁而成, 导致它们的分解为四个构造体系的原因, 与南半球冈瓦纳大陆裂解有关。依据上述的区域构造规律, 作者认为青藏高原内部结构的原型为旋扭沟-弧-盆系统, 属帕米尔-喀喇昆仑-喜马拉雅反 S 状造山带尾弧的组成部分。后经印度板块俯冲、青藏-三江-印度尼西亚反 S 状造山带头部弧右旋隆升两组动力系统叠加结果。

关键词: 反 S 状旋扭造山带; 旋扭沟-弧-盆系统; 青藏高原结构与隆升; 大陆边缘造山带

中图分类号: P548, P56

文献标识码: A

导言

北半球规模最大的造山带是北美大陆西南缘的阿拉斯加-科迪勒拉-马德雷山链和欧亚大陆南缘的阿尔卑斯-扎格罗斯-喜马拉雅-印度尼西亚山链。这些造山带都是经过了漫长的构造演化历史, 构成复杂程度不同的内部结构^[1]。但是决定现今的构造地貌特征的是新生代以来, 特别是新近纪延至今日的新构造运动。新构造运动的表现形式, 主要是深位剪切走滑断裂、地震活动、火山活动、山脉的隆升、盆地的沉降。从现今的构造地貌特征来看, 北美大陆西南缘的造山带平面图像呈明显的反 S 状。这个现象李四光早在上世纪^[1~4]曾多次提及, 先后用歹字形、η 型、之字型、反 S 型构造体系命名。并将其分为头部、腰部、尾部三段论述。限于那个时代地质资料较少, 且多数文献偏重于新生代以前的古构造研究。现在看来, 控制现今构造地貌型式的主要构造形迹是新生代以来的弧形和直线深位剪切走滑断裂^[5]。

收稿日期: 2007-01-08

作者简介: 李东旭 (1933-), 男, 中国地质大学教授、博士生导师, 地质力学研究所客座研究员。长期从事构造地质学、地质力学教学与科研。E-mail: dxlee18@126.com.

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 阿拉斯加—科迪勒拉—马德雷造山带

根据构造地貌特征可将阿拉斯加—科迪勒拉—马德雷山链构成的巨型反S状造山带分为头部阿拉斯加右旋隆升弧形造山带、腰部科迪勒拉右旋直线走滑造山带和尾部以加勒比海为中心的左旋沉降旋卷沟—弧—盆系统(图1)。

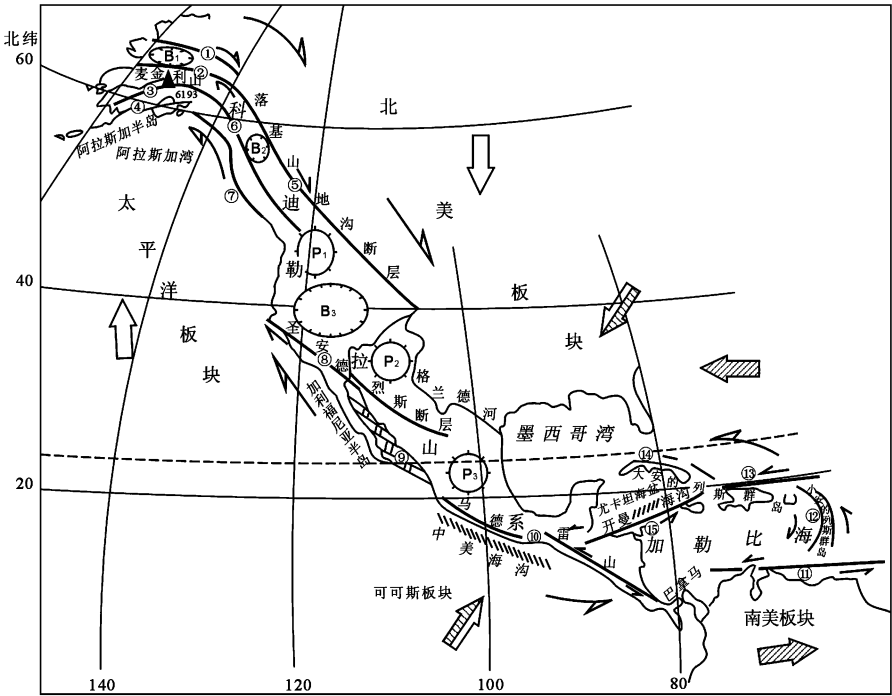


图1 阿拉斯加—科迪勒拉—马德雷反S状旋扭造山带

Fig 1 Alaska-Cordilleran-Madre reversed S-shaped transrotational orogenic belt

①布鲁克斯断层; ②科育库卡断层; ③德纳里断层; ④卡斯特莱山断层; ⑤落基山地沟走滑断裂; ⑥海岸山走滑断裂; ⑦费尔威瑟弧形断层; ⑧圣安德烈斯走滑断裂; ⑨加利福尼亚湾斜列转换断层带; ⑩南马德雷山—巴拿马火山断裂线; ⑪委内瑞拉EW向断层; ⑫小安的列斯弧形断裂; ⑬海地岛(波多黎各)北岸EW向断层; ⑭古巴左旋走滑断层; ⑮开曼海沟断裂带; P₁-哥伦比亚高原; P₂-科罗拉多高原; P₃-墨西哥高原; B₁-科育库卡盆地; B₂-鲍瑟尔盆地; B₃-大盆地; B₄-帕拉斯(马皮米)盆地半侧箭头示断裂、造山带、岛弧相对运动指向。空心箭头示北美板块与太平洋板块相对运动方向; 实心箭头示北美板块与南美板块相对扭动方向; 半空半实箭头示两者的合力。

1.1 阿拉斯加右旋隆升弧形造山带

北美新构造图^[9]上清楚表明,阿拉斯加地区存在几条弧形走滑断层(卡斯特莱、德纳里、科育库卡、布鲁克斯),这些弧形断层总体向北凸出,向西撒开,向东收敛;向南与科迪勒拉造山带内的走滑断层相连。德纳里断层是阿拉斯加的一条重要活动断层,研究资料较多^[7-10],例如,2002年10月23日阿拉斯加发生的M_s7.3级地震,震中就位于德纳里断裂带上,表明这一弧形走滑断层现今仍在强烈活动。从航空照片上可清楚看到阿拉斯加冰川地形被这条断层右旋错开117~143m,据冰川最后消融时间距今约为1~1.4万年,计算断层滑移

速率为 $8 \sim 14 \text{ mm/a}$; 结合每次地震的平均位移量, 利用断层滑移速率推算重复间隔为540年。德纳里断层南侧麦金利山(海拔6193m)是北美最高山峰^[11], 与断层北部落差达2000m。Plaker^[12], 用磷灰石和锆石做裂变径迹测年, 算出从4.2Ma末至今, 麦金利隆升速率为 1.3 mm/a 。一般认为: 阿拉斯加北美的隆升是由于太平洋板块与北美板块相对运动有关, Avelallemant^[13]据1996~1998年GPS资料算出太平洋板块相对北美板块向NW方向运动速率为 74 mm/a 。也有人推测为 52 mm/a 。古地磁测定阿拉斯加中西部从白垩纪以来围绕一个直立轴逆时针旋转约 40° ^[14]。从以上几方面资料, 不难看出, 阿拉斯加地区, 既有近水平旋转位移, 又有垂直上升; 从而判定阿拉斯加至少从早更新世以来呈现的是顺时针螺旋上升运动状态^[7]。

1.2 科迪勒拉右旋直线走滑造山带

阿拉斯加弧形造山带向南转为平行北美大陆西海岸的NW向科迪勒拉造山带, 一直延伸到墨西哥马德雷山脉, 构成这一巨大反S状构造体系的腰部。控制这一现今地貌特征的主要构造就是山脉两侧的巨大的走滑断裂带^[15~19]。德纳里断层以南的断层, 延向海岸山断裂, 相继就是著名的圣安德烈斯断裂^[20]; 再南一直延伸到加利福尼亚海湾的“转换断层”带; 山脉的东侧, 就是与西侧平行的巨大的‘落基山地沟’右旋走滑断裂。由此可见, 整个北美科迪勒拉造山带是夹持在一对顺时针剪切走滑断裂带之中。因此, Kelley (1958) 认为哥伦比亚弧的弯曲很可能起因于走滑断层。Wise (1963) 所做的科迪勒拉造山带内部应力状态图呈顺时针旋转, 将盆地山岭省的东西向伸解释释为巨型右旋走滑断层导生的第二序次构造。Caire^[21]认为, 在这科迪勒拉山脉中的一系列高原和盆地(如哥伦比亚高原、科罗拉多高原、鲍瑟尔盆地、帕拉斯盆地等)都是由于右旋剪切走滑断层导致的“滚珠轴承”构造。圣安德烈斯断层的频发地震表明, 这一系列平行大陆边缘的大型右行走滑断裂现今都有不同程度的活动。也就是说控制现今科迪勒拉山脉的构造体制是剪切走滑断裂。

1.3 加勒比海左旋沉降沟-弧-盆系统

从南马德雷山脉向东, 穿过危地马拉和洪都拉斯以后, 就进入了加勒比海, 牙买加、多米尼加、波多黎各诸岛, 都属于这个反S状构造的尾部^[4]。从现在的资料看^[22~27], 在南马德雷以东走滑断裂已转为反时针方向, 例如东南墨西哥恰帕斯-塔瓦斯科地区的走滑断层^[27]。这一反S状构造体系的尾弧大致以委内瑞拉东西向海岸线为界, 这个向南西突出的火山岛弧外侧太平洋方面是弧形的中美海沟; 其东侧就是以加勒比海为中心的旋涡构造。其中, 大安的列斯群岛是西印度群岛的主体, 是科迪勒拉山系的延伸部分, 多属大陆岛(古巴、海地、牙买加、波多黎各等岛); 小安的列斯群岛主要由弧形排列的背风群岛、向风群岛及南缘的众多小岛组成, 岛弧内侧以火山岛为主, 外侧多由灰岩构成。其东巴多斯岛和多巴奇岛非火山岛也略成弧形, 向风群岛之西委内瑞拉盆地东部的海岭也呈弧形, 三个旋回面向南收敛构成帚状, 标志着委内瑞拉海岸山脉断层呈左旋滑移; 在哥伦比亚盆地之西至开曼海沟之间的两道弧形海岭向北收敛, 标志着开曼一波多黎各断层也呈左行走滑, 这也是加勒比海旋涡形成的动力条件之一^[7]。李四光^[4]还提出巴哈马群岛、佛罗里达半岛可能是围绕墨西哥湾的另一旋卷构造体系的组成部分。由此可见, 反S型造山带的尾部比较复杂, 影响范围较大, 这里不仅是地震、火山多发地区; 同时在尾弧内侧还存在多个沉降深度较大的海盆, 其中委内瑞拉海盆最大深度5630m, 哥伦比亚海盆最大深度4535m, 尤卡坦海盆最大深度4647m, 被火山岛弧和非火山岛弧环绕, 构成高油气远景区, 总体呈左旋的沟-弧-盆连环旋扭构造系统。

2 反S状造山带构造动力学三维模式

一般说来，一个构造体系是一定时期、一定方式的构造应力场形成的变形场^[1]。但是对于一个大型构造系统而言，就涉及到‘复杂系统’问题^[28]，也就是说，当总体动力作用方式一致，但由于组成介质的不均一，或局部边界条件的差异，或其他动力条件的联合或复合导致变形效果的不一致，而总体上又是有联系的同一系统。从上述北美大陆西部边缘造山带构造地貌特征不难看出，虽然控制地震活动、火山活动的活动断裂具有连续性；但在头、腰和尾三个部位在构造几何学、运动学和动力学方面又有差异。也就是说一个大系统内又可根据局部变形场的差异分出若干个二级以下低级序的子系统^[28]。从阿拉斯加—科迪勒拉—马德雷这一平面上呈反S状大陆边缘造山带的构造地貌特征看，分为头部、腰部和尾部三个二级子系统是合理的（图2）。

从反S状造山带地貌三维几何形态看，头部弧曲率半径相比尾部弧的曲率半径小的多，结构比较简单，上升幅度最大，造成高原或高峰；尾部弧内侧影响范围大，下降幅度也大，构成形态复杂的岛弧盆地群；正负高差在10km左右。腰部为连接头尾反向突出弧形的直线延伸的山脉，因此，从纵剖面上的地形起伏看，北西方头弧高，南东方尾弧低。

造成北美这一巨大反S状构造地貌型式的构造动力只有用李四光先生提出的经向和纬向两大水平运动趋势才能得到圆满解释。这一反S状造山带主体科迪勒拉造山带的晚期右旋走滑断层，显然是北美大陆向南、太平洋板块向北相对扭动的产物。而在阿拉斯加地区则是太平洋板块斜向俯冲和北美大陆向南运动联合作用构成旋转剪切的结果；而麦金利地区的强烈隆升也与太平洋板块向北的俯冲有关。至于尾部的旋扭沟弧盆体系形成的边界条件，李四光^[1,4]早有解释，认为这一大规模旋扭构造是由于南北美大陆之间，即在北纬10°~20°之间两条大型走向东西的纬向走滑断层相对错动所导致，南部的断裂位于南美北部马拉开波盆地北部，向东延至委内瑞拉海岸东西向断层；北部断裂位于古巴北海岸至波多黎各北海岸。宏观图象清楚表明，北美大陆向西、南美大陆向东错移。这种差异滑动不仅牵引马德雷山脉向

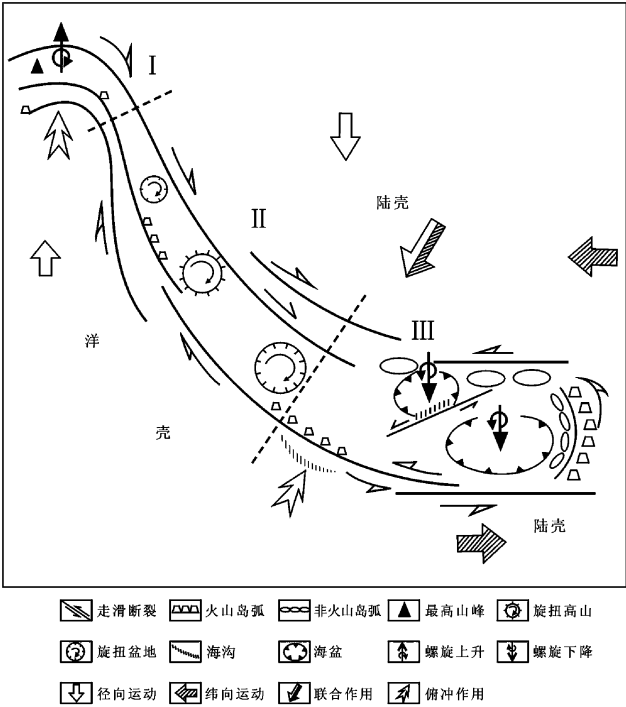


图2 北半球大陆西南边缘反S状造山带构造地貌模式

Fig 2 3D tectono-geomorphological model of the reversed S-shaped orogenic belt on the southwestern margin of the continent in the northern hemisphere
I -Head arc; II-Middle section; III-Tail arc

东偏转，也是导致加勒比海地区形成左旋旋涡构造的原因。

3 亚欧大陆边缘造山带构造地貌解析

用北美大陆西缘建立的反 S 状构造三维模式解析从阿尔卑斯、喜马拉雅至印度尼西亚欧亚大陆边缘山链的构造地貌特征^[29]，将不难发现，自西向东有四套类似型式的构造体系（图 3），它们是：1）阿尔卑斯—狄纳里克—克里特反 S 状造山带；2）托罗斯—扎格罗斯—莫克兰反 S 状造山带；3）喜马拉雅反 S 状造山带；4）青藏—三江—印度尼西亚反 S 状造山带。

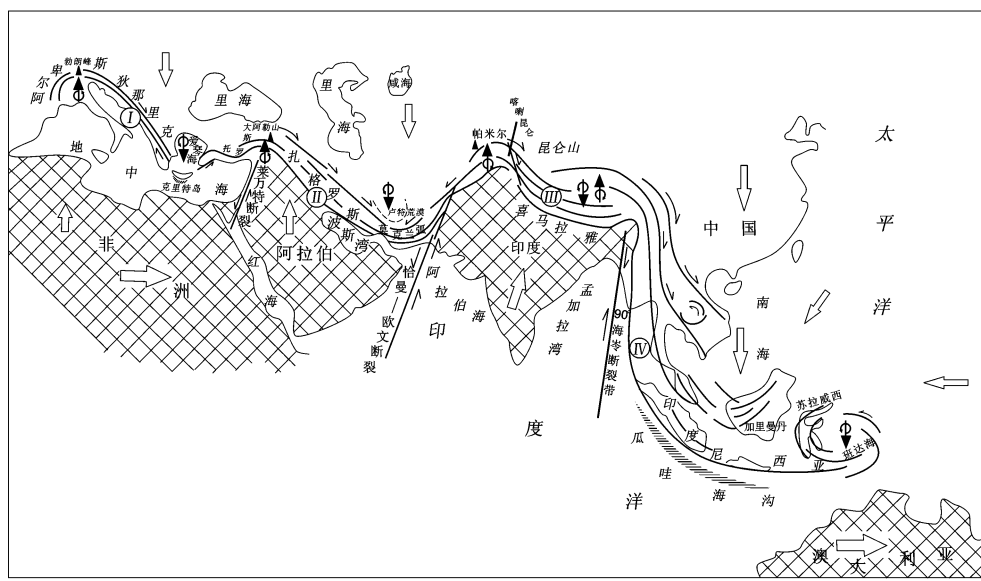


图 3 阿尔卑斯—喜马拉雅—印尼反 S 状旋扭构造连锁山链略图

Fig 3 Alps-Himalaya-Indonesia reversed S-shaped transrotational mountain chain

I. 阿尔卑斯—狄纳里克—克里特反 S 状旋扭造山带；II. 东托罗斯—扎格罗斯—莫克兰反 S 状旋扭造山带；III. 帕米尔—喜马拉雅反 S 状旋扭造山带；IV. 青藏—滇缅—印尼批 S 状旋扭造山带；黑线条示构造线；单箭头示走滑断层；斜方网示冈瓦纳裂解板块；空心箭头示大陆反大洋板块相对运动方向

⬆️ 示螺旋上升；⬇️ 示螺旋下降

3.1 阿尔卑斯—迪纳里克—克里特岛反 S 状构造带（简称 ADK）

西欧阿尔卑斯山脉向东延伸分三支，北边一支延向喀尔巴阡山；南部一支延入亚平宁山；中间一支延至迪纳里克阿尔卑斯山，实际上，它也是欧洲大陆西南边缘造山带的主体，由于这里的推覆构造非常显著，故此过去许多研究者忽略了新生代以来平行造山带的走滑断裂，从诸多地质文献^[29~32]中都可看到德罗瓦、萨瓦亚德里亚一系列走向 NW 的断层都具有右旋走滑性质，而且切割了早期的推覆构造，并控制着喀斯特泉的分布^[33]。围绕波盆地的西阿尔卑斯和东阿尔卑斯的断层也是弧形走滑性质^[34~35]。南欧最高山峰勃朗峰（4810m）、伯尔尼纳（4052m），也正是位于这一反 S 状造山带头部右旋弧形断裂带中，这种构造地貌特征与北美阿拉斯加—科迪勒拉极为相似。有趣的是经过希腊品都斯山及爱奥尼亚群岛向东延伸，与克里特岛和罗德岛相连构成一向南凸出的岛弧，克里特岛南侧是地中海中的海伦尼克

海沟、Pliny 海沟、Strabo 海沟；克里特岛内侧爱琴海中的基克拉迪群岛和南斯拉提群岛都是弧形火山岛弧、不谋而合的是 Meyerhoff^[36]，在他阐发他的热流带脉动理论时，引用了 Papazachos 和 Comninakis^[37,38] 两人制作的爱琴海震中分布图和应力分布图，以及 Senger (1979) 制作的正断层分布图，都认为爱琴海存在旋卷构造，把这些事实联系起来，不难看出：这一反 S 状造山带的尾弧的结构与前述北美反 S 状大陆边缘造山带的尾部弧的加勒比海地区的旋卷沟弧盆系统何等相似。

3.2 东南托罗斯—扎格罗斯—莫克兰反 S 状造山带 (简称 TZM)

土耳其东南的托罗斯山脉是向北凸出的弧形，其中最高峰是大阿勒山 (5165m)、托罗斯山脉向东延伸与扎格罗斯山脉相连。Hessami 等人^[39~41] 早注意到扎格罗斯褶皱-冲断带被走滑断层切割现象。Jackson 和 McKenzie (1984) 发现扎格罗斯山北麓大于 5 级的地震沿着现今活动的走滑断层将基底冲断层顺时针水平错开。右旋位移幅度向东南递减，与莫克兰相连，莫克兰弧是伊朗至巴基斯坦的活动弧形系统^[42]。Bonlin, J. (1991) 认为是莫克兰弧形造山带是阿曼湾洋壳向欧亚大陆俯冲的结果。莫克兰弧北侧是活火山带及沉陷盆地，在卢特荒漠、马什喀尔湖一带有火山弧分布，早在 1966 年 Wellman^[43] 对该区弧形断裂力学性质鉴定后，认为卢特荒漠是“地壳物质逆时针螺旋下沉”形成的旋卷构造。这个地区也是地震频发地区，是众所周知的。莫克兰弧的尾部截止于近南北走向的巨型左旋恰曼走滑断裂，这条巨型断裂带对莫克兰弧的牵引作用是明显的。

东南托罗斯—扎格罗斯—莫克兰反 S 状造山带特殊之处是它的尾部旋扭沟弧盆系统，由于整体隆升，前锋弧升为陆缘弧，陆缘海已变为荒漠和盐湖。但它的构造体制与旋扭沟弧盆系统是一致的。

3.3 帕米尔—喀喇昆仑—喜马拉雅反 S 状造山带 (简称 PKH)

Burtman 和 Mainer^[44] 将帕米尔及其周缘地区分为三个构造带：北帕米尔、中帕米尔和南帕米尔。分隔这些构造带的缝合线（走滑断裂）从阿富汗的兴都库什山绕过帕米尔到藏北昆仑山，形成明显的向北凸出弧形；而喀喇昆仑大型右行走滑断层切过这些缝合线。环绕帕米尔的弧形断裂构成反 S 状造山带的头部；喀喇昆仑走滑断裂带相当于反 S 状造山带的腰部。李海兵等^[45]，许志琴^[46] 等对这条走滑断层进行了研究，根据同构造淡色花岗岩锆石 U-Pb 同位素测定这条断层年龄为 23~25ma；连续变形 12ma，长期平均滑移速率为 11mm/a，累积位移量 > 280km，至今仍以斜向右旋方式剪切滑动。与喀喇昆仑山脉相连的喜马拉雅山脉实质上 PKH 反 S 状造山带的尾弧，由于印度板块的强烈俯冲，原来在弧前的特提斯海沟已消失在亚洲板块之下。虽然整个喜马拉雅相应地强烈隆升，但是据国家测绘局多次精密测量结果，珠峰地区的地壳运动仍伴有明显地水平运动，约以每年 6~7cm 速度向 NEE 方向运动。根据反 S 状造山带构造力学模式，从喜马拉雅弧往北至冈底斯及羌塘地区归为旋扭沟弧盆系统，由于印度板块的强烈压缩聚合而隆升。因此，潘桂堂^[47,48] 确定青藏高原内部结构为多弧盆系统是符合实际的。对应喜马拉雅尾弧内侧地区，出现的“弧—弧、弧—陆碰撞结合带及其间的岛弧或陆块拼贴”也是必然的。

3.4 青藏—三江—印度尼西亚群岛反 S 状造山带 (简称 QSI)

这个反 S 状造山带就是李四光先生很早以前提出康藏歹字型构造^[1,4,49]，大家多已熟知。这里补充说明的是控制这个反 S 状造山带的主要构造形迹是新近纪以来控震的活动走滑断层。青藏高原及其北东边缘的向北东突出的弧形走滑断裂大都属头部弧组成部分，这些断裂转向横断山脉三江地区呈南北向右旋走滑断裂，一直延伸到马来半岛，由于印度板块的大幅

度滑移，及太平洋板块与东亚大陆推挤的远程效应，致使这个反 S 状造山带的腰部拉长。延至印度尼西亚班达海一带，构成由一系列群岛和海盆，组成的连环旋扭构造体系^[47]，近期地质地震、火山资料^[48, 50, 51]也表明新近纪以来，该区仍存在旋扭运动。值得注意的是，对应尾部弧爪哇岛弧的外侧的是印度洋中的弧形爪哇海沟，这与中美海沟相似^[9]。

综上所述，不难看出，从阿尔卑斯经扎格罗斯、喜马拉雅直到印度尼西亚，这一条宏伟的蜿蜒曲折的造山带，是由四个的反 S 状造山带连锁而成，它们的规模大小虽有差异，细节有所差异，但是它们形成的整体构造动力学机制却是基本一致的^[9]。

4 连锁反 S 状造山带动力学解析

阿尔卑斯—喜马拉雅—印度尼西亚山链的结构之所以比阿拉斯加—科迪勒拉—马德雷山链复杂，原因在于边界条件复杂，虽然欧亚大陆与北美大陆一样，整体比较均匀的向南（赤道）方向滑移，但是来自南半球的冈瓦纳大陆被裂解为非洲板块、阿拉伯板块、印度板块和澳大利亚板块，从而造成欧亚大陆边界条件和边界力的不均一性（图 4）。裂解冈瓦纳大陆的主要构造是三条近南北向的深切洋壳的剪切断裂带^[5]。

第一条断裂带是地中海的东部边界的莱万特断裂带，这条断裂从红海的亚喀巴湾经死海穿过巴勒斯坦，黎巴嫩延入土耳其托罗斯山脉之南，这条断裂不仅分隔非洲板块和阿拉伯板块，而且也分隔了 ADK 反 S 状造山带和 TZM 反 S 状造山带。

第二条是恰曼断裂带，这条规模巨大的深位左旋剪切断裂带，向南可与印度洋底的欧文断裂相连，这条断裂是分隔阿拉伯板块和印度板块的界线，断裂西侧对莫克兰弧有牵引作用，对东侧的帕米尔头部弧断裂带的发生右旋旋扭具有砥柱作用。

第三条近南北向构造带，就是沿印度洋中的东经 90°海岭发育的切割洋壳的深位剪切带。这条海岭的北段延至亚洲大陆向东错移至三江南北断裂带，是印度板块的东界，南段是澳洲板块的西界。

组成阿尔卑斯至印度尼西亚山链中的四个反 S 状造山带形成机制具有共性，也有差别，它们的共同特点是：反 S 状构造带的头部多为陆—陆会聚部位，不仅发生旋扭，而且强烈隆升；而在腰部，欧亚大陆 NW 向海岸线与南北向主压应力的最大剪切面平行，从而出现一系列右行走滑断层，形成压扭造山带；而尾部弧地区恰处于洋壳俯冲部位，因此在弧的外侧出现海沟，弧的内侧出现的是多岛弧盆，由于在尾部弧前缘已裂解的冈瓦纳陆块相对向东运动，加之附近出现的纬向或经向走滑断层的牵引作用，从而导致左旋旋转；再加上重力均衡代偿，整体上呈多中心螺旋下降。

与标准模式差异较大的是托罗斯—扎格罗斯—莫克兰反 S 状造山带，它的尾弧前峰弧不是岛弧，而是陆缘弧，弧后盆也不是边缘海，而是陆相旋转沉降荒漠，火山链也不构成岛弧，总体上地貌景观可称之为“陆相旋扭弧盆系统”。导致这种畸变原因，主要是这个地区

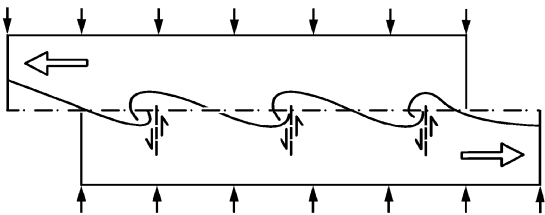


图 4 连锁反 S 型旋扭造山带动力学图解

Fig 4 Dynamic diagram of a reversed S-shaped transrotational orogenic chain

黑箭头示南北向碰撞；空心箭头示东西向平移；反 S 曲线为造山带；点断线示东西向走滑断裂；断线示南北向走滑断裂

抬升较早。至于帕米尔—喀喇昆仑—喜马拉雅—反S 状造山带的畸变，下节详述。

5 青藏高原的内部结构和隆升

作为地球“第三级”的青藏高原，广为国内外地质工作者关注和神往，几十年来通过艰苦地调查，取得了大量实际资料，论著如雨后春笋，特别是新一轮1/25 万地调工作，资料更加丰富详实，为今后深入认识青藏高原地质的真实面貌奠定了坚实的基础。回顾以往大地构造研究，主要偏重于冈瓦纳大陆和欧亚大陆缝合线的确定和深部结构的地球物理研究，许多学者采用多种测试方法计算印度板块向北移动的速度和青藏高原隆升速度等等^[52~55]，研究不断深入。文献之多，不胜列举。但对于青藏高原内部结构的总体认识尚无定论，可喜的是以潘桂棠^[56,57]为首的部分地质学家认为青藏高原内部结构属“多岛弧—盆地系统”，指出在大洋在最终萎缩消亡过程中表现为一系列弧后盆地萎缩和弧—弧碰撞和弧—陆碰撞造山，看来这一结论是符合实际的。但是为什么在青藏地区出现多弧盆系统？在欧亚大陆上如此特殊，似乎尚缺乏论证。盆地的压缩、弧—弧碰撞、弧—陆碰撞主要是挤压性构造体制，为什么现今所见的大量断裂大都呈现弧形剪切走滑性质？看来应从另一角度思考。

1) 从北半球大陆边缘反S 状造山带构造地貌三维模式进行解析，不难发现，青藏高原主体主要是帕米尔—喀喇昆仑—喜马拉雅反S 状构造体系的尾部弧组成部分。它的原型相当于现今的加勒比海、班达海、爱琴海的旋扭沟—弧—盆系统。在这个系统中的岛弧，既有火山岛弧，也有非火山岛弧；既又有海盆，又有海沟；而今所见弧—弧碰撞、弧—陆碰撞等一系列特殊造山模式，实质上是由于印度板块的强烈推挤，使其收缩压扁的结果。也就是说，现今青藏高原的内部结构是被碰撞、压缩改造的地壳增厚隆升的旋扭沟弧盆系统。残留的海水构成现今所见的高原上星罗棋布的咸水湖。

2) 印度板块向青藏高原强烈俯冲、碰撞、拼贴、挤压应以压性断裂为主，为什么现今观察到是大量弧形走滑活动断裂带以及整体物质向东逃逸，显然又是与青藏—三江—印度尼西亚反S 状构造体系有关，因为这里正是QSI 造山带的头部弧部位，属旋扭剪切构造体制。

3) 由此可见，新生代以来青藏高原是由三组构造动力系统复合或联合作用的结果。仅仅从印度板块一个方面寻求答案，尽管这组作用力异常强大，并不能合理解释青藏高原所有复杂的地质构造现象。

4) 从建立的反S 状造山带三维模式看，头部弧大都构成高山或高原，具有旋扭隆升的特点。因此，青藏高原隆升的动力，除去均衡代偿作用，不仅来源于印度板块作用。QSI 反S 状造山带头部弧的旋扭对青藏高原的隆升也应有助长或耦合作用。

6 结论与讨论

1) 大陆边缘反S 状造山带是新近纪以来至今仍在持续活动的构造体系，组成它们的主要构造形迹是曲线和直线深位剪切走滑断裂，受其控制的地震活动和火山活动就是明显的证据。从1999 年在多米尼加 Penrose 召开的“大陆边缘俯冲到走滑的转换”会议的许多报告中不难看出，不少学者也开始注意到大陆边缘走滑断层的存在，只是很少从全球构造系统论的角度进行解析。

2) 旋扭（海）沟—（岛）弧—（海）盆系统是北半球大陆边缘反S 状造山带的组成部

分, 是一种特殊的旋扭构造型式。导致其形成的原因是夹持在两侧大洋之间的狭窄陆壳受到纬向走滑断裂的拖曳, 也就是说南半球相对北半球向东扭动, 从而构成左旋旋扭构造型式。

3) 大陆边缘反S状造山带三维模式的建立提供了复杂联合构造体系的实例。反映了一个大型构造体系的复杂性; 说明一个大型构造体系的不同部位局部边界条件虽有差异, 但总体上又是有联系的整体。

4) 从全球构造大系统的视野解析青藏高原地质, 就不难理解青藏高原为甚么出现多沟-弧-盆系统, 也不难理解为什么印度板块向北推挤同时出现右旋弧形走滑。

参 考 文 献

- [1] 李四光. 旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题[J]. 地质学报, 1954, 34 (4).
- [2] 李四光. 地球表面形象变迁之主因[J]. 中国地质学会志, 1926, 6 (3~4): 209~262.
- [3] Lee JS. Some characteristic structural types in eastern Asia and their bearing upon the problem of continental movements [J]. Geological Magazine, 1929, 66 (8, 9, 10).
- [4] 李四光. 地壳构造与地壳运动《天文、地质、古生物》资料摘要(初稿)[M]. 1972. 科学出版社.
- [5] 李东旭. 旋扭构造动力学[M]. 北京, 地质出版社, 2003, 188~205.
- [6] King Ph B. New Tectonic Map of North America 1:5000000. GSA Bulletin., 1969.
- [7] Ratchkovski NA, Wiener S, Hansen RA. Seismotectonics of the Central Denali fault, Alaska and the 2002 Denali fault earthquake sequence [J]. Bull. Seis. Soc. Am. 6B, 2004 S156~S174.
- [8] Fisher MA, Hamis RA, Nøkleberg WJ, Pelerine L, Glen JM. Geophysical data reveal the crustal structure of the Alaska Range orogen within the aftershock zone of the $M=7.9$ Denali Fault earthquake. Bull. Seis. Soc. Am. B6, 2004, S107~S131.
- [9] Martirosyan A, Ansen RH, Ratchkovski N. Strong-motion records of the 2002 Denali Fault, Alaska earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20, 579~596.
- [10] Hansen RA, Ratchkovski NA. Seismological aspects of the 2002 Denali Fault, Alaska earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20, 555~563.
- [11] Lanphere MA, Reed BL. The McKinley sequence of granitic rocks: a key element in the accretionary history of southern Alaska (USA) [J]. Jour Geophy Res, 1985, 90, B13, 11413~11430.
- [12] Plafker G., Nasser CW, Zimmernan RA et al. Cenozoic uplift history of the Mount McKinley area in the central Alaska Range based on fission-trace dating [J]. US Geol Sur Bull, 1992, 2041, 202~212.
- [13] Avelallemant HG. Arc-parallel displacement within the western Aleutian Island, Alaska: Preliminary GPS results [A]. In: Geological Society of America, Century of the Pacific Rim [C]. 1999, 31 (6), A~35.
- [14] Haussler P, Mueller J F, Moran S, Power J, Saltus R. Tectonics, Mountain Building, Subduction, and Volcanism in South-Central Alaska [M]. U. S. Geological Survey, 2003.
- [15] Wyld S J, Umhoefer P, Wright J E. Reconstructing Northern Cordilleran Terranes along Known Cretaceous and Cenozoic Strike-slip Faults: Implications for BAJA-BC Hypothesis and Other Models.
- [16] Parsons T, McCarty J, Thompson GA. Very different crustal response of extreme extension in the southern basin and range and Colorado plateau transition Pacific Section. American Association of Petroleum Geologists Publication GB78.
- [17] Lisowski M, Savage JC, Prescott WH. The velocity field along the San Andreas Fault in central and southern California. J. Geophys [J]. Res., 1996, 96 (B5): 585~611.
- [18] Nelson MR, Jones EH. Paleomagnetism and crustal rotations along a shear zone, Las Vegas Range, South Nevada [J]. Tectonics, 1987, 6, 13~33.
- [19] Martel SJ. Formation of compound strike-slip fault zones, Mount Abbot quadrangle, California [J]. J. Struct. Geol., 1990, 12 (7): 869~882.
- [20] Schwartz DP. Paleoseismicity, persistence of segments and temporal clustering of large earthquakes—example from the San Andres, Wasatch, and Lost River fault zone. USGS Open-file Report, 1989 (315): 361~375.
- [21] Gaire A. Geotectonique giratoire [J]. Geologie en Minibouw, 1979, 58 (2): 241~252.

- [22] Pindell J, Kennan L. Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. GACAST, 2001.
- [23] Moran-Zenteno, Dante J. et al. Timing and petrogenesis of Tertiary silicic volcanism in relation to strike-slip tectonics in the north-contrail part of Sierra Madre Del Sur, Mexico. GSA, 2003.
- [24] Aliz-àlvarez SA, Nieto-Samaniego AF, Morán-Zenteno DJ, Alba-Aldave L. Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern Mexico [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 118: 1~14.
- [25] Rivas JZ. Structural model of the Chiapas-Tabasco area (Southeast Mexico). CGG-ASI, 2003.
- [26] Pulliam J. et al. Aftershock study of the subduction to strike-slip transition of the North American-Caribbean Plate boundary in the Dominican Republic. Earthquakes. IRIS. 5-year proposal. 2006.
- [27] Haenggi W T. Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico and adjacent USA. TOMO LIV, 2001, 28~66. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- [28] 李东旭. 地质力学与系统论 [J]. 地球科学 1989 增刊.
- [29] Bajc J. et al. JHD and DD methods of relocation on the 1998 Bovar-KRN mountain (Slovenia) earthquake sequence and mechanics of moderate strike-slip events [J]. Geophysical Research Abstracts, 2003, 5: 07601.
- [30] Bertoluzza L, Perotti CR. A finite-element model of the stress field in strike-slip basins: implications for the Permian tectonics of the Southern Alps (Italy) [J]. Tectonophysics, 1997, 208: 185~197.
- [31] Fitgk F, Suhadolc P, Costa G. Realistic strong ground motion scenarios for seismic hazard assessment studies at the Alps-Dinarides Junction. University of Trieste, 2003.
- [32] Meijninger BML. Geographic Information systems analysis of northwestern Greece: A tectonic investigation of northwestern Greece by means of remote sensing analysis and digital terrain analysis. Utrecht University, The Netherlands, 2001.
- [33] Komac B. The Karst springs of the Karin massif. Geografski zbornik, 2001, XLII, 2001.
- [34] Van Bemmelen RW. The Alpine loop of the Tethys zone. Tectonophysics, 1969, 8 (2): 107~113.
- [35] Vialon P, Rodette P, Menard G. Indentation and rotation in the western Alpine. In: Coward MP, Dietrich MP, Dietrich D, Park RG (eds), Alpine Tectonics. Special Publication Geological Society London, 1989, 45: 329~338.
- [36] Megerhoff Arther A et al. Surge Tectonics: A new hypothesis of Earth dynamics. In: S Chatterjee, N Hutton III (eds), New Concepts in Global Tectonics. Texas: Texas Tech University Press, 1992, 367~371.
- [37] Papagachos BC, Comninakis PE. Models of Lithospheric interaction in the Aegean area. In: Bijr-Duval B, Montadert L (eds), Structural History of the Mediterranean Basins. Paris: Edition Techniqe, 1977, 319~331.
- [38] Papagachos BC, et al. Fault plane solutions in the Aegean sea and the surrounding area and their tectonic implication. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata—An International Journal of Earth Sciences, 1998, 39 (3): 199~218.
- [39] Hessami K, Koyi HA, Talbot CJ. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt (abstract), 2001, 24 (1), Hans Ramberg Tectonic Laboratory, Institute of Earth Sciences, Uppsala University.
- [40] Inger S, Allen M, Blanc E, Hassami K, Talebian M, Jackson J. Regional- to reservoir-scale tectonic evolution of the Zagros Orogenic Belt (abstract), 2002, 24 (1), Hans Ramberg Tectonic Laboratory, Institute of Earth Science, Uppsala University.
- [41] Hessami K. Tectonic History and present-day deformation in the Zagros fold-thrust belt. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 700. Uppsala, 2002.
- [42] Farhoudi G, Karing DE. Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. Geodogy, 1997, 5 (11): 664~668.
- [43] Wellman HW. Active wrench fault of Iran, Afghanistan and Pakistan. Geologisch Rundschau, 1966, 55 (2): 719~735.
- [44] Lohr T. A Short Story about the Geological History of the Pamir—Review; Lothar Ratsbacher University of Mining and Technology, Freiberg, 2001.
- [45] 李海兵, Franck Valli, 许志琴, 杨经绥, Paul Tappinier, Robin Lacassin, 陈松永, 戚学祥, Marie-Luce Chevalier. 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.
- [46] 许志琴, 等. 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 [J]. 中国地质, 2006, 33 (2): 221~238.
- [47] 李东旭, 周济元. 地质力学导论 [M]. 北京地质出版社, 1986, 223~225.
- [48] Beaudouin T, Bellier O, Sebrier M. Present-day stress and deformation field within the Sulawesi Island area (Indonesia): geodynamic implications. Société Géologique de France, 2003, 174 (3): 305~317.
- [49] 李四光. 地质力学概论 [M]. 科学出版社, 1962.

- [50] Dardji N, Villemain T, Rampoux JP. Paleostress and strike-slip movement; the Gimandiri fault zone, West Java, Indonesia. 1994.
- [51] Sich K. The Sumatran fault system, Indonesia. GIS Laboratory, 2006.
- [52] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程以及机制讨论 [J]. 中国科学 (D 辑), 1996, 26 (4): 289~295.
- [53] 潘裕生. 青藏高原的形成与升降 [J]. 地学前缘, 1999, 6 (3): 1~9.
- [54] 肖序常, 李连栋主编. 青藏高原的构造演化与升降机制 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2000.
- [55] 吴珍汉, 叶培盛, 胡道功, 等. 青藏高原腹地的地壳变形与构造地貌形成演化过程 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [56] 潘桂堂, 徐强, 王立金, 等. 青藏高原多岛弧—盆系格局机制 [J]. 矿物岩石, 2001, 21 (3).
- [57] 潘桂堂, 王立金. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置 [J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21 (3): 1~26.

3D MODEL OF REVERSED S-SHAPED OROGENIC BELTS ON THE CONTINENTAL MARGIN: WITH A DISCUSSION OF THE INTERNAL STRUCTURE AND UPLIFT OF THE QINGHAI-TIBET PLATEAU

LI Dong-xu

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the tectono-geomorphological features and characteristics of neotectonic movement on the southwestern margin of the North American continent, the author has established a 3D tectonomechanic model of the reversed S-shaped continental-margin orogenic belt of the northern hemisphere. This zigzag orogenic belt extends from Alaska through the Cordillera to the Caribbean and may be divided into three sections: (1) the Alaska region, which, as a head arc, is an arcuate dextral shear uplifted orogenic belt; (2) the Cordillera orogenic belt, which as a middle section, is a straight dextral strike-slip orogenic belt; and (3) the region from south of the Madre Mountains to the Caribbean Sea, which, as a tail arc, is a sinistral transrotational "trench-arc-basin system". The author used this model to check the orogenic belts on the southern margin of the Eurasian continent and ascertained that the zigzag mountain chain from the Alps through Zagros and Himalaya to Indonesia is composed of four connected reversed S-shaped orogenic belts. The cause for their decomposition into four separate tectonic systems is related to the breakup of the supercontinent Gondwana in the southern hemisphere. According to the above-mentioned regional tectonic characteristics, the author thinks that the original internal structure of the Qinghai-Tibet Plateau was a transrotational trench-arc-basin system, belonging to the tail arc of the Pamir-Karakorum-Himalaya reversed S-shaped orogenic belt. Later it underwent the superimposition of two dynamic systems, the subduction of the Indian plate and the dextral shear and uplift of the head arc of the Qinghai-Tibet-Sanjiang-Indonesia reversed S-shaped orogenic belt.

Key words: reversed S-shaped transrotational orogenic belt; rotational trench-arc-basin system; structure and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau; continental-margin orogenic belt